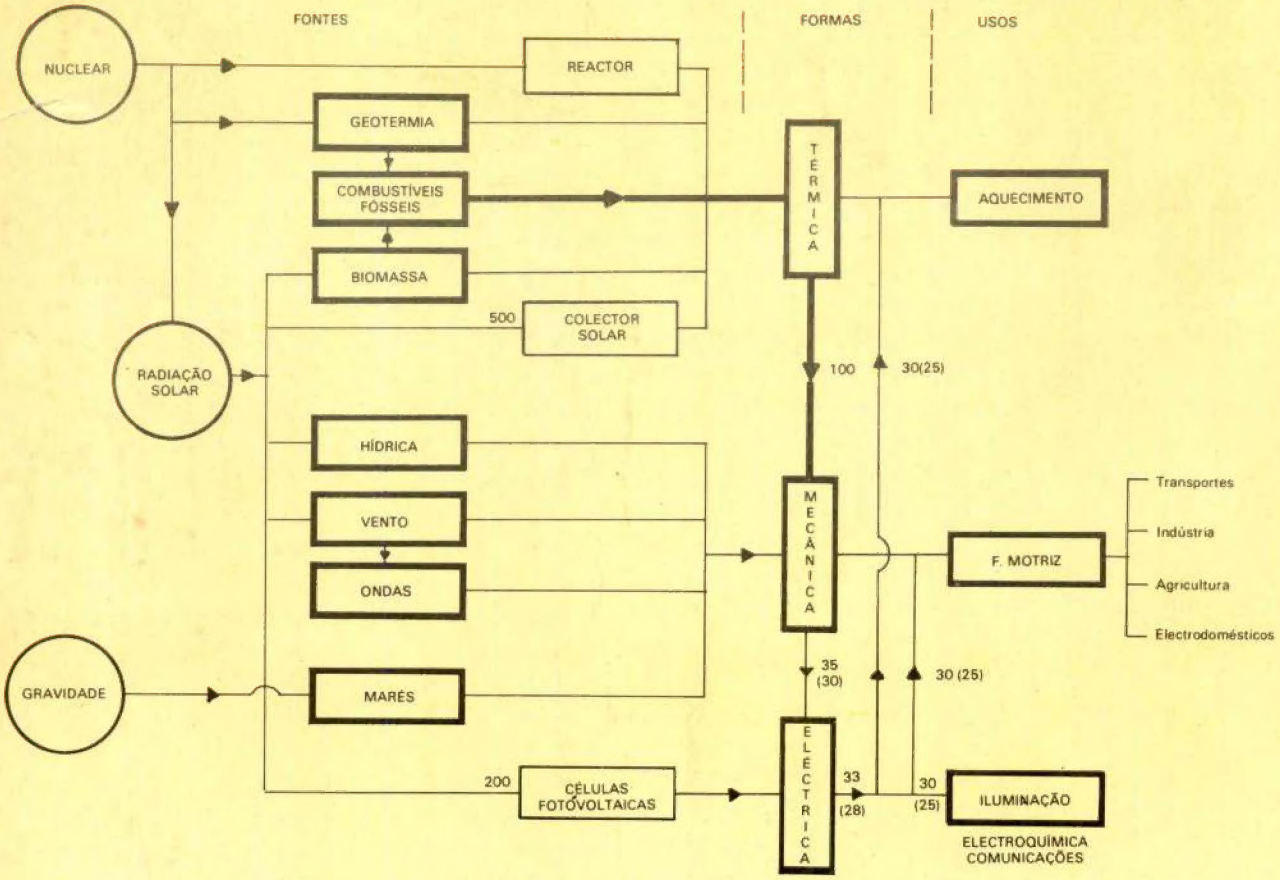
técnica

PALESTRAS, LIÇÕES SÍNTESE E COMUNICAÇÕES APRESENTADAS NO ÂMBITO DAS COMEMORAÇÕES DOS 70 ANOS DO IST



Fontes, formas, usos da energia. Percursos energéticos.

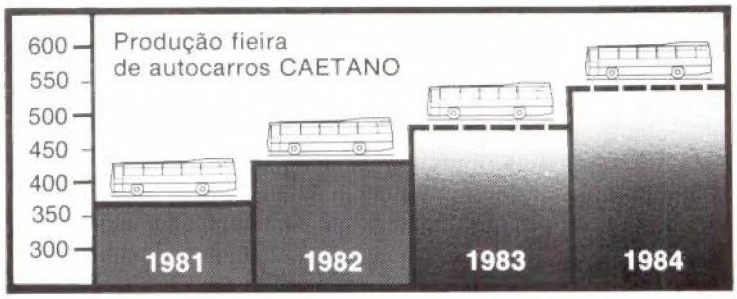
464

revista de engenharia junho 1983

associação dos estudantes do instituto superior técnico

sonarte

O PRIMEIRO FABRICANTE NACIONAL DE AUTOCARROS



A excelente e tradicional qualidade dos nossos produtos é, há muito, reconhecida e altamente apreciada. Nomeadamente no que se refere ao mercado externo continuamos acrescentando à qualidade uma competitividade dia-a-dia maior em Portugal e na exportação — Reino-Unido, França, Dinamarca, Suíça, Canárias, Moçambique, Cabo Verde e Peru. Os nossos níveis de produtividade estão cada vez mais próximos do padrão europeu.

Num país a caminho da Europa
somos já uma Empresa de dimensão europeia.

Salvador Caetano

técnica

TÉCNICA 464 • JUNHO 1983 • PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL

SUMÁRIO

2 **NOTAS DA DIRECÇÃO**

5 VISÃO PROSPECTIVA DA ENERGIA ELÉCTRICA NO PANORAMA ENERGÉTICO PORTUGUÊS
DOMINGOS MOURA

15 TELECOMUNICAÇÕES: PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS
M. de ABREU FARO

25 A HIDRÁULICA HOJE
A. BETÂMIO DE ALMEIDA

31 CÁLCULO AUTOMÁTICO NO PROJECTO MECÂNICO
MANUEL SEABRA PEREIRA

39 ASPECTOS DA INVESTIGAÇÃO ACTUAL EM FÍSICA DOS PLASMAS
CARLOS MATOS FERREIRA

53 TRIBOANÁLISE
FERNANDO PINA DA SILVA

57 COMPUTADORES DIGITAIS: ASPECTOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS
AUGUSTO CASACA

67 O PROCESSO INFORMÁTICO NO ENSINO E NA INVESTIGAÇÃO
CARLOS SALEMA

71 A INFORMÁTICA NA GESTÃO DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
C.A.F. VARANDAS e J.L.B.M. FONSECA

79 UMA ANÁLISE À EVOLUÇÃO DO CENTRO DE CÁLCULO DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
M.J. de MATOS BARBOSA

TÉCNICA • REVISTA DE ENGENHARIA
PROPRIEDADE DA ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
DIRECTOR INTERINO — CARLOS FIGUEIREDO

DIRECÇÃO E ADMINISTRAÇÃO AEIST • AV. ROVISCO PAIS, 1000 LISBOA • TEL. 889323/881018
TIRAGEM 5000 EXEMPLARES

ASSINATURA (4 N.os) PORTUGAL 450$00 • ESTRANGEIRO 1200$00

notas da direcção

Convosco o número 464 da revista "TÉCNICA"
Contudo, "TÉCNICA 464" não vai ser somente mais um número da irregular actividade
que a "TÉCNICA-AEIST" tem apresentado nestes últimos anos.
"TÉCNICA 464" é assim, um número que nos vai
servir, esperamos, para pôr um ponto final na irregularidade da
publicação e igualmente informar-vos quanto aos aspectos essenciais
do relançamento da revista.
Importa então, neste momento, agradecer mais uma vez
a todos aqueles que ao longo de vários anos connosco colaboraram.
Importa igualmente, agradecer àqueles que
com o seu empenhamento nos permitem hoje relançar a publicação.
Assim, agradecimentos muito especiais para o professor Abreu Faro,
colaborador de há largos anos da revista "TÉCNICA",
que acedeu ao convite da Associação de estudantes
do IST para exercer a direcção científica da revista a partir do próximo
número, bem como para o Conselho Directivo do IST
que através do apoio concedido muito contribuíu para este relançamento.

****

Não pretendendo aqui explicitar a política editorial futura,
o que caberáa ao próximo director e vos será por ele apresentada no
próximo número, transcrevemos contudo, algumas directrizes já
definidas e que poderão contribuir para uma
melhor compreensão da situação.

plano editorial anual

A revista "TÉCNICA" publicará anualmente quatro números
de natureza técnico-científica. Quaisquer números especiais que venha
eventualmente a publicar terão um carácter supletivo
em relação aos quatro números base e serão enviados
gratuitamente aos assinantes.

secções

No âmbito da "TÉCNICA" funcionarão, em princípio,
três secções: Artigos publicados a convite do editor, artigos
convencionais de uma revista científica e notas científicas.
As notas científicas destinam-se à publicação de
resultados inéditos de investigação científica ou tecnológica, e terão
o limite de 8 páginas dactilografadas (segundo as normas de publicação).
Os artigos publicados por convite terão o limite de 25 páginas
dactilografadas, podendo em casos especiais
ser esse espaço alargado por acordo com a Direcção da "TÉCNICA".
Os artigos convencionais, de índole científica ou tecnico-científica,
terão um limite de 15 páginas dactilografadas.
Os autores dos textos enviados para publicação, deverão fazer
acompanhados os seus trabalhos de uma declaração em como estes não
foram previamente publicados nem se encontrem em vias
de publicação noutro local. Isto enquanto decorrer
o seu processo na "TÉCNICA".

A "TÉCNICA" procurará, sempre que possível e por princípio, o parecer de individualidades de reconhecida competência, tecnico-científica, no sentido de apurar da originalidade, qualidade e interesse científico dos trabalhos que lhe são enviados. Esta atitude não se aplica aos artigos convidados a menos que os autores o desejem.
À direcção da "TÉCNICA" caberá sempre a aceitação ou recusa dos originais que lhe sejam enviados.
A "TÉCNICA" notificará os autores ou devolverá os trabalhos submetidos a apreciação num prazo máximo de 60 dias após a recepção do original.
Os trabalhos publicados serão registados com a data de recepção do original na "TÉCNICA" e disso se dará pública notícia em respectiva nota de fim de página. A "TÉCNICA" oferecerá 5 exemplares da revista, por cada trabalho publicado, independentemente do número de autores.

aos assinantes

Cabendo aos nossos assinantes um papel essencial na viabilização económica da revista, a direcção da "TÉCNICA" solicita-lhes que procedam à actualização da sua assinatura.
As anteriores assinaturas, que embora anuais se referiam a 10 números da publicação foram-se arrastando encontrando-se, ainda, algumas em vigor. Tal facto compromete hoje o relançamento que pretendemos efectuar.
Assim, apelamos para a compreensão dos nossos assinantes certos de que conscientes da importância da publicação não negarão este apoio que lhes solicitamos.

normas de publicação

Os originais são obrigatoriamente redigidos em Português;
Os trabalhos deverão ser inteiramente dactilografados em papel A4, a dois espaços;
Os originais deverão ser acompanhados de resumo e "abstract", não excedendo qualquer deles 80 palavras;
Os originais deverão ser acompanhados de uma folha com o título em português e inglês, especialidade em que se enquadra, identificação do/s autor/s, residência, local de trabalho e outras informações consideradas úteis;
Os originais destinados à secção notas científicas deverão conter essa indicação expressa;
Todas as figuras deverão ser rigorosamente desenhadas a tinta da China, com letras, algarismos ou outros símbolos decalcados ou rigorosamente desenhados. No texto deve constar o local de inserção de cada figura, bem como o espaço que lhe é destinado;
De cada original deverão ser enviadas 3 cópias à "TÉCNICA".

devolução de originais existentes

A direcção da "TÉCNICA" sendo-lhe impossível garantir a publicação dos originais enviados e acumulados durante os últimos anos, procederá tão breve quanto possível à sua devolução aos respectivos autores.
A "TÉCNICA" pede a compreensão para este modo de proceder mas só assim poderá lançar-se de modo novo e equilibrado na publicação de originais. Evidentemente que os autores que desejarem manter a intenção de publicação podem reenviar os originais reformulados, caso seja necessário e nos moldes agora previstos mas não se oferece conveniente introduzir qualquer prioridade relativamente aos artigos convencionais e notas científicas que a partir deste número se apresentem a publicação.

anuncie na técnica

Com uma tiragem de 5 000 exemplares e uma difusão à escala nacional e internacional a "TÉCNICA" abarca nos seus leitores quadros científicos e técnicos das mais variadas empresas, bem como grande número de professores e estudantes universitários.
Face a isto, poderemos concluir que se a "TÉCNICA" merece o apoio de todos os que de algum modo se encontram ligados à Engenharia — Escolas, Institutos de Investigação e Empresas — ela é, para além de um veículo da investigação teórica e experimental, um veículo por excelência de produtos e serviços, em suma, das actividas da vossa empresa.
Através da inserção de publicidade da vossa empresa na revista "TÉCNICA" está apoiando esta publicação e comunicando com um universo de potenciais interessados nas vossas actividades.

ANUNCIE NA "TÉCNICA", CONTACTE
QUINTUPLO — Promoção Publicitária, Lda.
Rua da Trindade, 5-1.º Dt.º — Tels. 32 37 73-36 64 45 — 1200 LISBOA

Visão Prospectiva da Energia Eléctrica no Panorama Energético Português (I)

DOMINGOS MOURA, Professor Catedrático do IST.

Pode admitir-se que os sistemas energéticos serão, dentro de alguns anos muito diferentes dos que têm servido, neste século, as sociedades industrializadas. Para ir modelando os cursos de Engenharia Electrotécnica tendo em conta, quanto possível, as futuras mudanças nas tecnologias e nos equipamentos, é necessário reflectir sobre as possíveis evoluções dos sistemas de energia.

Sublinha-se que a visão prospectiva, a prazo longo, que adiante se propõe foi pensada para o país em que estamos e não para um mundo vago, indefinido no lugar e no tempo.

O panorama energético português pode ser caracterizado pelos números que o Quadro I apresenta. Os números são extraídos do relatório justificativo do lançamento de um projecto global de investigação e desenvolvimento sobre energia a realizar pelas escolas da Universidade Técnica de Lisboa [1]· os números que constam do relatório da Universidade Técnica foram obtidos, por sua vez, a partir do estudo "A procura da Energia em Portugal" elaborado em 1980 pela Direcção Geral de Energia e pelo Grupo de Estudos Básicos de Economia Industrial [2].

Os números apresentados referem-se à "energia útil" Por energia útil entendemos aquela que é efectivamente utilizada e não a que pode ser medida em pontos intermédios do percurso energético que precedem o uso final. Por exemplo para aquecer, no Inverno, um local habitado é necessária, em Portugal, uma potência, por unidade de volume, de cerca de 25 W/m^3. Se for usado equipamento eléctrico, será instalada uma resistência que dissipe essa potência Contudo para entregar a um ambiente a mesma potência usando uma chaminé de sala terei que queimar lenha que me dê uma potência sensivelmente superior pois parte do calor sai pela chaminé nos gases aquecidos. Entretanto a energia útil será a mesma nos dois casos. Falar em energia útil corresponde a precisar o ponto do percurso energético onde se mede o fluxo de energia. Isto nem sempre será isento de controvérsia.

A energia entregue aos veículos dos transportes públicos serve para os deslocar. Contudo no fim do seu período diário de circulação, os veículos estarão estacionados onde estavam 24 horas antes: as energias potencial e cinética do sistema não variaram. As pessoas transportadas também estarão no fim do dia onde estavam 24 horas antes. Durante o dia circularam entre os locais de trabalho e os locais de repouso e foi essa a utilidade dos meios de transporte. A energia útil poderá ser medida pelas toneladas de combustível entregues aos veículos, ou pela energia entregue na extremidade dos veios dos motores de tracção, ou por medida efectuada em qualquer outro ponto do percurso energético, sendo certo que, qualquer que seja o valor medido, a energia degrada-se, no final, em calor.

Outra expressão usada no Quadro I é "electricidade específica". Por "electricidade específica" entendem-se os usos que exigem a entrega da energia aos receptores finais sobre a forma eléctrica, a não ser que se aceite incorrer em incomonidades e prejuízos graves. Alguns exemplos: iluminação; força motriz nos electrodomésticos; equipamentos para comunicações; a maioria da força motriz industrial; electroquímica. Os números do Quadro I referentes ao ano 2000, resultam de conjuntos coerentes de hipóteses, nenhuma delas inverosímil, mas não são apresentados como valores esperados, pois isso presumiria saber o que nos espera. As hipóteses a que correspondem os números do ano

(I) Lição livre dada no dia 5 de Maio de 1982, integrada nas comemorações do 70.º aniversário do Instituto Superior Técnico.

QUADRO I
ENERGIA ÚTIL

SECTOR		ANO 1977 [ktep]	ANO 1977 % (parcial)	ANO 1977 % (total)	ANO 2000 [ktep]	ANO 2000 % (parcial)	ANO 2000 % (total)
Doméstico e Serviços	electricidade específica	237	40	—	458	32	—
	aquecimento	350	60	—	980	68	—
	total	587	—	13	1438	—	13
Transportes	pessoas — individual	769	59	—	1021	58	—
	pessoas — colectivo	140			262		
	mercadorias	640	41	—	945	42	—
	total	1549	—	35	2228	—	21
Indústria e Agricultura	electricidade específica	486	21	—	1409		—
	aquecimento	300	56	—	4360		—
	carburante	540	23	—	1390		—
	total	2326	—	52	7159		66
	TOTAL GERAL	4462	—	100	10825		100

2000 admitem a continuação dos ritmos baixos no crescimento da economia mundial e a adaptação de políticas vigorosas de conservação de energia [2]; todavia teve-se em conta que os consumos de energia por habitante são, em Portugal, demasiado baixos quando comparados com zonas desenvolvidas de latitude e clima análogos aos nossos.

Do relatório [1] e do estudo [2] citados pode concluir-se que, na ausência de alterações no sistema energético português, aos consumos de energia útil indicados no Quadro I correspondem, aproximadamente, os valores, nas fontes primárias, que constam do Quadro II.

QUADRO II

Consumos nas fontes primárias (ano 2000)

● Combustíveis importados excepto coque	14,36 Mtep
● Coque	1,43 Mtep
● Hidroelectricidade	24,62 TWh
● Energias "novas"	0,34 Mtep

As unidades quilotonelada equivalente de petróleo, ktep (usada no Quadro I) e megatonelada equivalente de petróleo, Mtep (usada no Quadro II) são múltiplos da tonelada equivalente de petróleo, tep. Esta última unidade deve ser entendida como uma unidade rigorosa de energia, baseada, por convenção, na equivalência 1 tep<>10^7 kcal.

Em 1981 cada tonelada de petróleo importado custou-nos cerca de 20 contos (*). Admitindo que este custo, a preços constantes, se mantém — e provavelmente vai subir — a importação de 14,36 Mtep de petróleo ("crude"), no ano 2000, custar-nos-á cerca de 300 milhões de contos (a preços e câmbios de Maio de 1982, insiste-se).

Perante este número vale a pena meditar na estrutura dos processos energéticos que a figura 1 resume.

O processo energético que, predominantemente, tem servido o sistema económico mundial é o que se assinala a traço forte: combustíveis fósseis → energia térmica → energia mecânica. Desta última, parcela significativa é convertida em energia eléctrica, usada para iluminar, para mover, para aquecer. Em Portugal tem-se recorrido também à energia hídrica a qual tem sido, entre nós, nos últimos trinta anos, a maior fonte para a obtenção de electricidade. Contudo, nos anos mais recentes, o peso relativo das fontes térmicas volta a acentuar-se.

A obtenção da energia eléctrica a partir da energia térmica é processo condenável se examinado à luz de critérios de rendimento: de 100 unidades de energia sob a forma térmica obtidas pela queima de um combustível conseguem-se cerca de 30 unidades de energia sob a

(*) Este custo foi calculado usando o câmbio "72 escudos por dólar US", que vigorava em Maio de 1982.

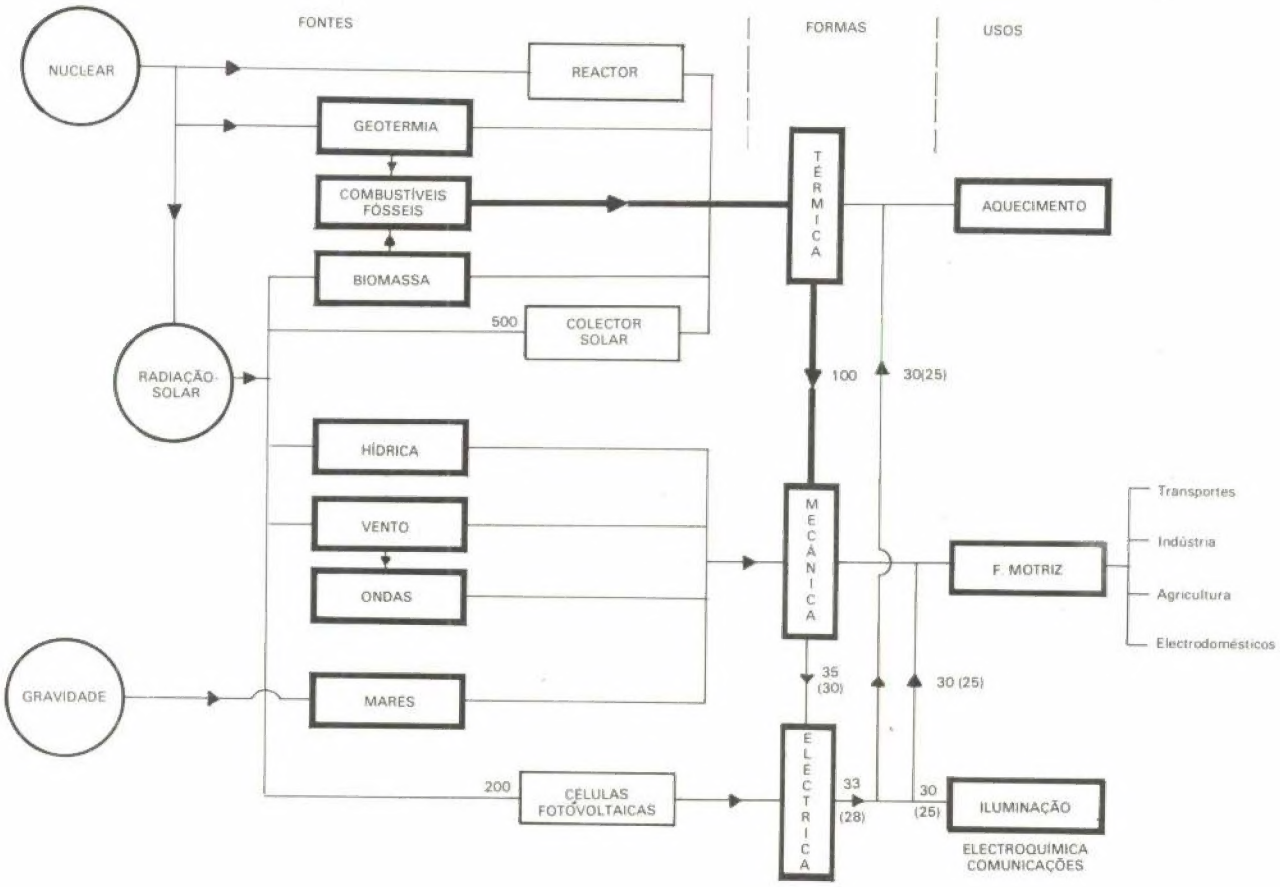


Figura 1 — Fontes, formas, usos da energia. Percursos energéticos.

forma eléctrica nos locais onde é utilizada; este último valor baixa para cerca de 25 se a fonte térmica for um reactor nuclear em que, por limitações metalúrgicas, tem de ser baixa a entalpia do agente termodinâmico. Não era sem razão que LUCIEN POINCARÉ escrevia no princípio deste século [3]: "... é singular inépcia degradar a energia química, convertê-la em calor, depois transformar em trabalho a parcela modesta que o princípio de CARNOT nos permite recolher sob a forma de energia mecânica e, enfim, numa derradeira transformação utilizar este trabalho para obter electricidade".

A situação aproxima-se do absurdo quando a energia eléctrica é, depois, degradada para obter calor. Se a queima do combustível fosse feita directamente nos locais onde o calor é necessário, das 100 unidades de energia térmica poder-se-iam obter 70 a 80 unidades de energia útil em vez das 25 ou 30 que se conseguem passando pela forma eléctrica.

Pode acrescentar-se que o investimento em equipamento para a queima dos combustíveis será, provavelmente, menor do que o investimento global correspondente ao ciclo das energias "química — térmica — mecânica — eléctrica — térmica". Engana algumas pessoas o facto de apenas ser feito pelo utilizador (ou pelo construtor civil que constrói o edifício) o investimento correspondente à conversão final da energia eléctrica em calor. Todavia alguém paga o resto: o conjunto dos contribuintes sobrecarregados pelos gigantescos investimentos em centrais e redes.

Perdulário, esbanjador, pouco lógico, o ciclo "termo — mecano — eléctrico" tem sido, em todo o mundo, o usado para fornecer energia eléctrica à maioria dos consumidores. Em Portugal até 1950 era essa, também, a situação e a ela voltamos aceleradamente. Interessa pois perguntar porque foi e é assim, o que obriga a uma brevíssima excursão pelos custos da energia eléctrica.

* * *

O custo da energia eléctrica depende dos custos do capital; este custo é medido pelo encargo anual que nos traz o investimento feito. O custo da energia depende, ainda, do custo do combustível. Depende também de outros factores, com peso relativo menor, e não relevantes para esta reflexão.

Se uma fonte de energia eléctrica, trabalha muitas horas com carga elevada, os encargos anuais com o investimento dividem-se por muitas unidades de energia: diz-se que a fonte de energia teve uma elevada

"utilização" (* *), e a energia eléctrica obtida será barata. Isto é tanto mais verdadeiro quanto menos pesar o custo do combustível perante os encargos de capital.

Estas relações, banais e bem conhecidas, tiveram consequências importantes. Tão importantes que não é ousado afirmar que o progressivo desenvolvimento da indústria da energia eléctrica é possibilitado e coincide cronologicamente com o progressivo aumento da "utilização". Na figura 2 representa-se como variou a "utilização" média das centrais eléctricas nos Estados Unidos entre 1900 e 1960. Nas redes europeias a evolução foi semelhante.

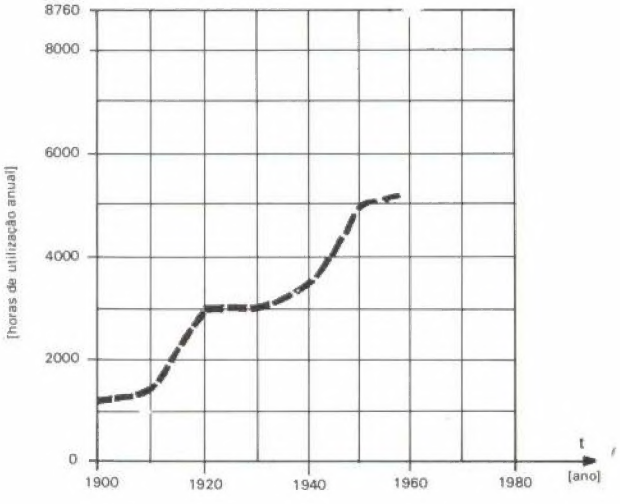


Figura 2 — Evolução da utilização anual [E.U.A.] (adaptação de SKROTZKI [6])

Podemos concluir que a mesma potência instalada permitiu obter em 1960 cerca de cinco vezes a energia que se obtinha em 1900. Isto foi possível porque se foram agrupando na mesma rede consumidores com diagramas de carga de forma muito desigual. Estatisticamente pode esperar-se que quanto maior o número de consumidores ligados, mais diversificadamente se vão distribuir ao longo do dia e do ano os diferentes consumos e, portanto, mais uniforme é a carga total.

O aumento do número de consumidores actua em duas direcções: diversifica as horas das pontas parciais, diversificação que a política de tarifas pode ajudar muito; aumenta a potência total. Este aumento da potência contém, ainda uma segunda possibilidade de ganho: o custo de um grupo gerador de 100 MW é bem menor do que o custo de dez grupos de 10 MW. O custo da unidade de potência decresce quando aumenta a potência unitária: é a chamada "economia de escala".

As economias de escala favoreceram a concentração dos meios de produção em grandes unidades térmicas e hídricas; e desfavoreceram as apropriações de energia em unidades de pequena potência servindo grupos restritos de consumidores, as quais não podiam aspirar nem a altas utilizações nem às "economias de escala" Acresce que a apropriação da energia de certas fontes tais como o vento, a radiação solar, as marés, as ondas do mar, dá-nos potências variando no tempo, periodicamente no caso das marés, de forma aleatória nos outros casos. A adaptação em relação ao consumo obriga a armazenamentos de energia que são caros.

Deve, ainda, acrescentar-se que a exploração de centrais térmicas de grande potência possibilita a compra maciça de combustíveis o que facilita a obtenção de preços baixos. Até 1973 os preços dos combustíveis eram tão baixos que a importação não causava preocupações quanto às balanças de pagamentos.

Estas circunstâncias condicionaram o desenvolvimento dos sistemas de energia em todo o mundo. E em Portugal também.

Porque estamos a comemorar os setenta anos da Universidade Técnica é justo lembrar o nome do professor José do Nascimento Ferreira Dias que foi um dos mais prestigiados e respeitados dos seus professores. Ao professor Ferreira Dias devem os portugueses, mais do que a ninguém, o sistema de centrais e redes eléctricas que hoje serve o país.

O aproveitamento tão completo quanto economicamente se justifica, dos recursos hídricos portugueses e o estabelecimento de um sistema de produção e de transmissão correctamente integrado, foram objectivos que nortearam a política de energia eléctrica que o professor Ferreira Dias defendeu e realizou; passados dezasseis anos sobre a sua prematura e inesperada morte estas orientações mantêm inteira actualidade.

Nos sistemas com grandes centrais térmicas alimentando redes extensas e densas adivinhavam-se algumas sombras: o desperdício de 2/3 do combustível na transformação termomecânica; a desigualdade na distribuição pela superfície da Terra das reservas de combustíveis fósseis o que, se favorecia o desenvolvimento de alguns países, era desfavorável para a maioria; a crescente complexidade e número dos órgãos auxiliares nos sistemas de energia eléctrica.

Durante quase um século estas sombras mal se entreviam num panorama geral muito brilhante. Subitamente avolumaram-se as sombras nos domínios da energia, sombras que depois se propagaram para outras áreas do sistema económico.

Mais uma vez foram os preços que deram o sinal do alarme: aumento explosivo dos preços do petróleo a partir de 1973. Portugal importa a quase totalidade dos combustíveis que usa e a sua balança comercial desequilibrou-se de modo insuportável.

A tomada de consciência da nova situação revelou números impressionantes: todos os anos gastam-se dezenas de milhões de contos com combustível para

(**) Nos estudos sobre a economia da energia eléctrica define-se a grandeza "utilização" que é medida pelo número de horas por ano que a central teria de trabalhar a plena carga para produzir a energia que efectivamente produz com o diagrama de carga real.

aquecer um pouco as águas dos estuários do Tejo (central do Carregado), do Sado (central de Setúbal) e no futuro as do Oceano Atlântico (central de Sines).

As perturbações consequentes da subida do preço da energia foram e são tão graves que é razoável perguntar se a energia não condiciona a vida económica, social e política dos povos muito mais do que oficialmente se admitia até 1973.

Uma pergunta de âmbito mais restrito é, certamente, pertinente: Não estarão mudados os condicionamentos que presidiram, no passado, à edificação dos sistemas de energia eléctrica?

Quando existe uma rede eléctrica cobrindo densamente o território nacional a rede pode funcionar como órgão compensador das irregularidades da produção. Sobretudo, como no caso de Portugal, quando existem ligadas à rede, centrais hidroeléctricas com grandes albufeiras. Isto que acontece em 1982, não acontecia no início do século.

Outra mudança deu-se no sentido em que actuam as economias de escala. Os custos directos e indirectos das avarias e paralizações dos grupos de grande potência têm levado a aumentar enormemente o investimento em órgãos de protecção, controlo, regulação, transmissão de informações, tratamento automático de dados e evidentemente, de medida. Com o gigantismo dos blocos de produção ganha-se no custo das máquinas principais mas perde-se na fiabilidade. Por isso o custo final da unidade de potência nos grandes blocos de produção térmica encaminha-se para ultrapassar o custo da unidade de potência em alguns dos captadores das "novas" energias.

É certo que o uso das novas energias talvez não consinta a alta qualidade segundo os padrões que se generalizaram para as redes de energia eléctrica. Todavia essa alta qualidade indispensável para um restrito número de consumidores não é necessária para a maioria.

Pode afigurar-se estranho mas pode vir a acontecer que as "economias de escala" funcionem a favor das unidades de pequena potência. Custos unitários de quase 70 contos por quilowatt em grupos de 300 MW a carvão, e custos entre 200 e 300 contos por quilowatt, que algumas informações estão a indicar serem os da central nuclear brasileira de Angra dos Reis, abrem as portas à entrada das "energias novas".

Actualmente nos EUA estima-se em dois biliões de dólares o custo de uma central nuclear de 1000 MW cuja instalação seja decidida em 1982 (estimativa de maio de 1982, a preços constantes). Note-se que este será o custo num país que domina totalmente, e possui dentro das suas fronteiras, a tecnologia das centrais nucleares, sem quaisquer dependências de "know-how" externo.

Tem interesse acompanhar a evolução do custo de potência instalada nas centrais eléctricas (dólares USA por quilowatt) entre 1930 e 1990. (Figura 3).

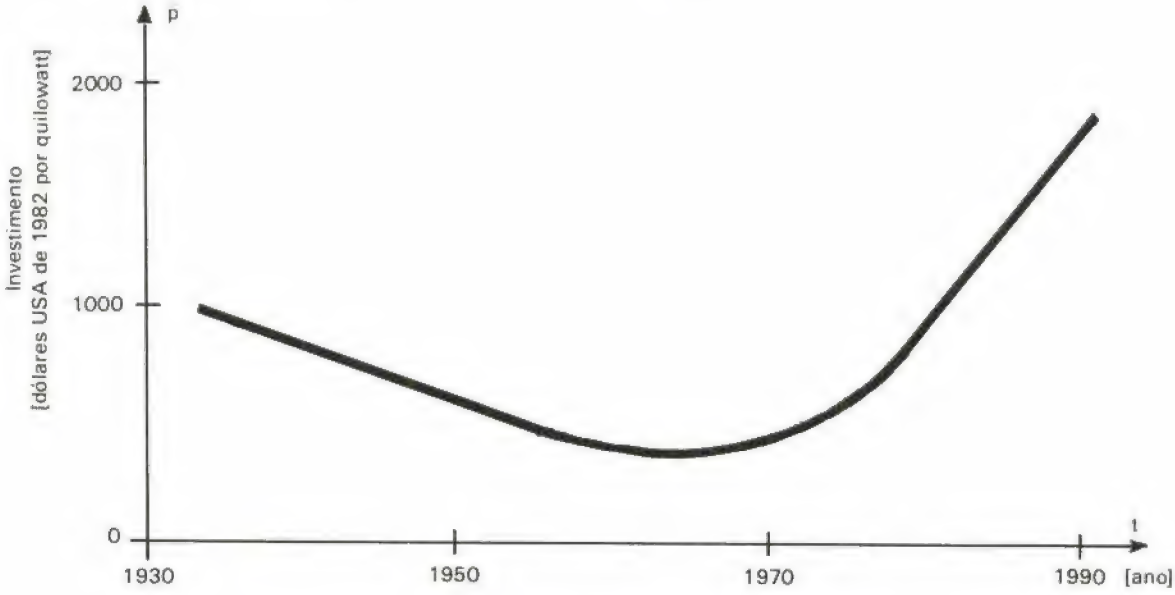


Figura 3 — Investimento unitário nas centrais eléctricas.

À euforia com que, na década 1960-1970, se acreditava num decréscimo indefinido do custo unitário das centrais sucedeu o alarme perante o seu incessante aumento.

Mesmo para as centrais que usam ciclos de vapor a melhor solução nem sempre será concentrar a produção em blocos de grande potência: de facto não parece fácil encontrar usos para as gigantescas quantidades de calor rejeitadas pelos condensadores dos grupos do Carregado, de Setúbal e de Sines. Todavia não é irrealista pensar na produção integrada de calor e de electricidade para usos industriais e agrícolas, usando

grupos de pequena potência. Há casos em que a energia eléctrica poderá ser tratada como um subproduto.

Peso do custo do combustível no custo da energia, importância do rendimento global das conversões, existência de um sistema com grande capacidade de regularização e que cobre todo o país, "economias de escala" favorecendo, em certos casos, as fontes de pequena potência, desenham um quadro muito diferente daquele que condicionou, até há poucos anos, o desenvolvimento dos sistemas de energia eléctrica. Neste novo quadro inserem-se com muita naturalidade as fontes de energia ditas "novas".

* * *

Contra o interesse da apropriação das novas energias ouve-se muitas vezes um argumento: essas energias apresentam-se muito difusas. O argumento merece exame.

Se calcularmos por via estatística, quais as densidades superficiais da potência e da energia anualmente absorvidas por diferentes categorias de consumidores obtemos valores que não diferem significativamente dos que constam do Quadro III.

QUADRO III

Densidades superficiais de potência e energia eléctricas nas zonas de consumo

	W/m²	kWh/m² ano
● Bairros residenciais	2-20	2-20
● Fábricas (na generalidade)	10-100	15-150
● Oficinas com máquinas ferramentas	20-200	30-300
● Oficinas com maquinaria pesada	100-1000	200-2000

A energia recebida durante um ano por um painel solar, no Sul de Portugal, ronda os 1500 kWh/m². Durante os cerca de 220 dias que se podem esperar, em cada ano, de céu claro, os colectores solares que hoje se constroem permitem aproveitar cerca de 400 kWh/m² ano sob a forma de energia térmica.

As células fotovoltaicas permitem actualmente recolher cerca de um terço deste valor isto é cerca de 130 kWh/m² ano. Assinale-se que para estas células o limite teórico do aproveitamento ronda os 600 kWh/m² ano.

Comparando as densidades superficiais com que a energia solar pode ser recolhida, com as densidades superficiais com que a energia é usada, verifica-se que os valores coincidem muito razoavelmente. É inevitável perguntar se não gastamos muito dinheiro para obter grandes concentrações de energia para depois gastarmos muito dinheiro para a espalhar com a densidade superficial com que naturalmente ocorre. E podemos concluir que em muitos casos, designadamente em locais de residência ou de serviços e também para alguns usos agrícolas e industriais, a captação local das novas energias é uma solução naturalmente adaptada à realidade das situações; por isso a procura de soluções tecnológicas sofisticadas para esta captação justifica-se inteiramente.

* * *

Desde o princípio do século até aos fins da Segunda Guerra Mundial a energia eléctrica foi obtida graças a transformações que incluiam o percurso termo-mecânico; e em menor escala graças à apropriação de uma energia renovável, a energia hídrica. São as soluções que designaremos por clássicas. Nos inícios da década de 50 passou também a oferecer-se a solução nuclear. Finalmente o decénio 70-80 foi o do aparecimento, como terceira solução, de novos ciclos que uns englobam, com imprecisão, sob a designação de "novas energias" outros, com imprecisão ainda maior, sob a designação de "energias renováveis". Seria, talvez, preferível dizer "novas maneiras de nos inserirmos nos fluxos da energia".

Se forem vencidas as dificuldades que hoje se opõem ao uso intensivo da energia nuclear as redes de transmissão de energia eléctrica vão tornar-se muito densas, vão veicular quantidades imensas de energia, vão usar tensões nominais cada vez mais elevadas, ultrapassando o megavolt. Tender-se-à para o "tudo eléctrico" que resultará do "tudo nuclear". Todavia, quanto a equipamentos eléctricos, continuarão a desenvolver-se as tecnologias clássicas complementadas por algumas tecnologias novas como as dos materiais supercondutores.

Contudo parece prematuro antever uma grande expansão das formas eléctricas da energia como consequência de uma grande expansão da energia nuclear. Quatro obstáculos maiores — que não são, talvez, os mais frequentemente citados — têm-se oposto à expansão do uso da energia nuclear nas formas que a ciência e as tecnologias permitem, hoje, explorar. São as seguintes:

1.º — A escassez do urânio: com as técnicas actualmente em uso industrial poderemos extrair das reservas mundiais de urânio cerca de 20 a 30% da energia que poderemos extrair das reservas mundiais de petróleo; ou cerca de 1 a 2% da energia que poderemos extrair das reservas mundiais de carvão [4].

2.º — Os riscos políticos que resultam da disseminação de materiais que permitem fabricar armas nucleares.

3.º — A incessante subida do custo das centrais nucleares [5].

4.º — Os riscos de longas imobilizações das centrais e os baixos factores de carga que, estatisticamente, os traduzem [5].

Mais do que os argumentos vindos dos lados da ecologia são os obstáculos citados que têm atrasado a expansão da energia nuclear. Esta não se tem revelado mais barata do que a obtida noutras fontes; enquanto não se conseguirem importantes desenvolvimentos tecnológicos não se pode considerar abundante.

A situação poderá alterar-se. Contudo mantem-se há demasiado tempo; é significativo que perdure sem

alteração visível apesar dos gigantescos esforços de investigação da década de setenta. Dizer, como alguém disse recentemente em Portugal que o recurso à solução nuclear é inevitável a prazo curto, revela um grande afastamento dos dados reais do problema.

Com esta referência tão breve não se pretendeu definir uma doutrina sobre o uso da energia nuclear. O uso dessa fonte engloba múltiplas questões que têm respostas diversas consoante o momento e o lugar. Pretendeu-se, sim, tentar explicar, embora sucintamente, porque não se recorre mais largamente ao uso das fontes nucleares e justificar que outras soluções merecem interesse.

* * *

Perante o atraso inesperado do desenvolvimento das soluções nucleares os países com abundantes reservas de combustíveis fósseis centram os seus esforços de investigação na melhoria do rendimento com que aproveitam os combustíveis: fluidização, magnetohidrodinâmica, rochas combustíveis, materiais que suportem temperaturas muito elevadas.

Os países que não possuem reservas conhecidas de combustíveis fósseis devem começar por praticar uma política de conservação de energia muito vigorosa; intensificar até aos limites do razoável a procura de combustíveis; preparar-se com pensamento científico e tecnológico autónomo, para as soluções nucleares. Quando, como é o caso de Portugal, dispõem com abundância de cursos de água, de sol, de vento e de mar,. devem aproveitá-los e orientar parcela importante dos esforços de investigação para as "novas" energias.

Através de Portugal descem para o mar a maioria dos grandes rios da Península Ibérica; nas latitudes de Portugal a radiação solar entrega anualmente cerca de 1500 quilowatt-hora por cada metro quadrado; o território é varrido por ventos regulares; a costa marítima extende-se por cerca de 1000 quilómetros sendo apreciável a amplitude das marés e das ondas. Como se isto não bastasse para o país se considerar rico em energias "novas", são numerosos os afloramentos de águas quentes o que sugere significativo potencial geotérmico; e abunda biomassa desperdiçada. Sobram os temas para motivar e ocupar os investigadores portugueses.

Os colectores solares, as fontes geotérmicas, a biomassa permitem obter calor. Tudo aconselha que o calor obtido destas fontes seja usado directamente para aquecimento, complementando a queima dos combustíveis fósseis. A energia eléctrica não deve ser usada para aquecimento por razões que já se expuseram.

Os cursos de água, o vento, as ondas do mar, as marés, dão-nos directamente energia mecânica. Conviria usá-la sem mais transformações para mover máquinas na agricultura e na indústria. Todavia as dificuldades de transmitir energia mecânica para além de poucas dezenas de metros obrigará, na generalidade das situações, a converter a energia mecânica em energia eléctrica.

A conversão à forma eléctrica da energia obtida das "novas" fontes contem desafios ao engenho dos técnicos e vai obrigar a desenvolver certas áreas da Electrotecnia. Sublinha-se que esta conversão pode favorecer a apropriação das "novas" energias por outro motivo além da facilidade de transmissão. O assunto merece mais algumas palavras.

* * *

Muitas novas energias fluem com potências muito variáveis no tempo. Por isso, no plano "potência-tempo" a área correspondente à energia afluente em pouco se sobrepõe à área correspondente à energia solicitada pelo consumidor. Isto encarece as novas energias pois a "utilização" dos captadores é baixa.

A ligação dos captadores a uma grande rede eléctrica feita de modo a assegurar o quase integral aproveitamento da energia afluente desliga a produção do consumo podendo equivaler a um armazenamento ideal.

Como se recordou, foi o aumento da utilização das fontes que permitiu o embaratecimento e a expansão da energia eléctrica obtida pelos processos tecnológicos que hoje consideramos clássicos. O aumento da utilização das novas fontes graças à sua inserção numa grande rede poderá aumentar decisivamente o seu interesse económico.

Pode admitir-se que a ligação, de muitos dos consumidores, à rede eléctrica nacional se venha a fazer, no futuro, com objectivos de regularização e apoio. Nesses consumidores existirão instalações para a apropriação de diversas formas de energia convertendo-as em energia eléctrica da qual uma parcela será logo usada pelo próprio consumidor e outra será entregue à rede nacional.

A injecção de energia na rede, proveniente das "novas" fontes será um dos domínios em que se irá exercitar a arte do electrotécnico. Algumas das novas fontes fornecem correntes contínuas, como acontece com as células fotovoltáicas; noutras será necessário garantir a captação da energia e a sua introdução na rede para uma banda muito larga de velocidades angulares dos geradores: é o caso das fontes eólicas, das minicentrais hidroeléctricas e, em menor grau, das ondas do mar e marés.

A conversão alterna-contínua e subsquente ondulação comandada pela frequência da rede receptora garante uma ligação assíncrona, consentindo a variação da velocidade do motor entre limites muito afastados e aligeira as exigências quanto ao controlo da frequência e da tensão no gerador primário. O fluir contínuo da corrente à saída da rectificação pode ser seccionado, sendo a energia introduzida na rede receptora mono ou trifásica, de acordo com a frequência (figura 4).

A inserção de numerosas fontes de energia de pequena potência ligadas à rede nacional, ao lado das fontes clássicas, é uma alteração desejável e que a longo prazo se pode admitir como provável no sistema eléctrico português. Todavia para isso requerem-se alterações na legislação, nos critérios e condições de

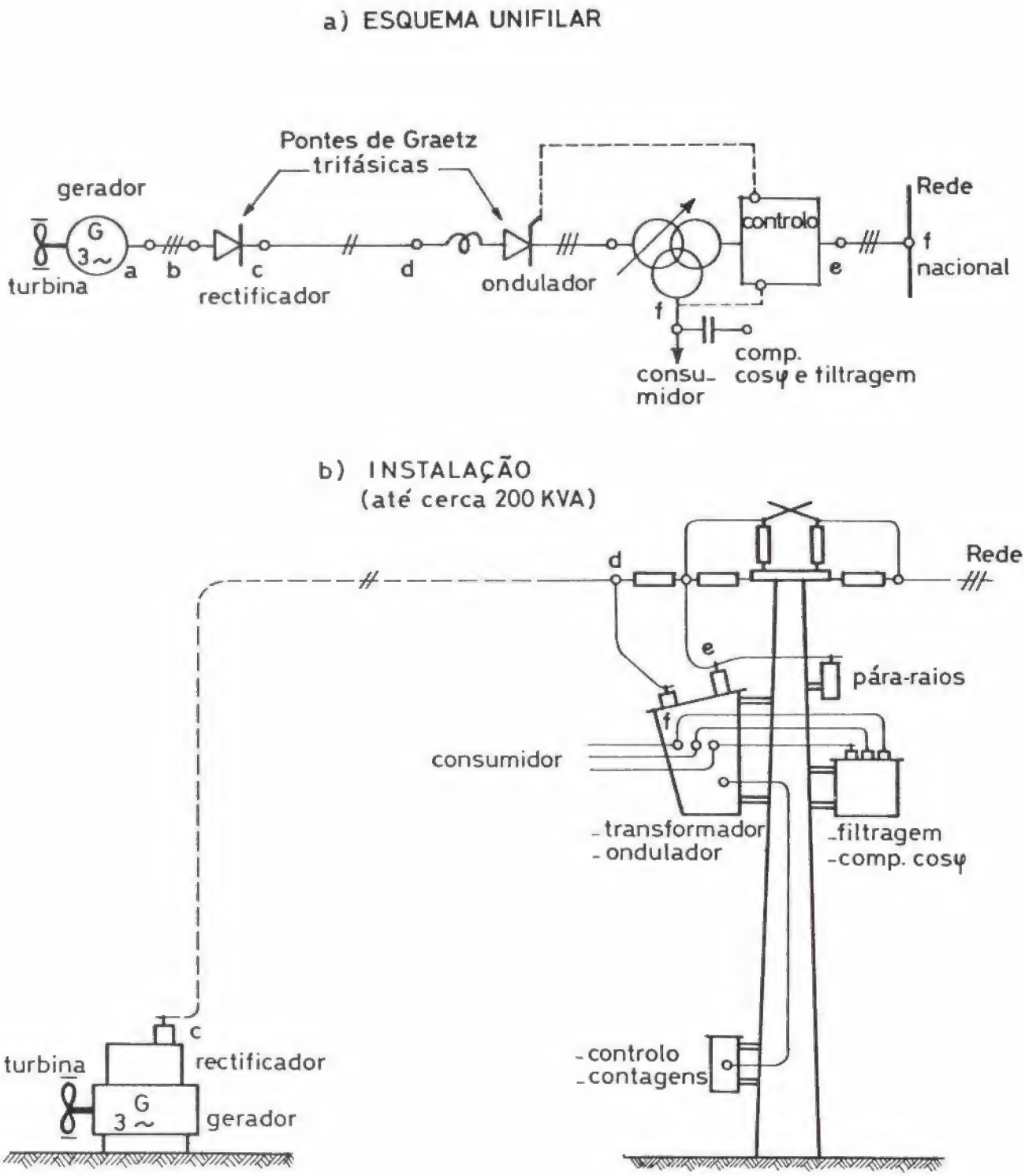


Figura 4- Ligação assíncrona com a rede nacional

concessão do crédito e outros apoios que podem favorecer o desenvolvimento que se esboçou.

É necessário definir, com alguma precisão, o quadro em que à rede nacional interessa receber a energia das "novas" fontes e, portanto, em que condições a poderá valorizar. Convirá distinguir a contribuição para reduzir importações (aspecto energia) e a contribuição para reduzir o investimento (aspecto potência). É difícil quantificar o peso destas duas contribuições afectadas por factores muito aleatórios. Todavia é indispensável fazê-lo para apontar quais as direcções mais vantajosas para o uso, em Portugal, das "novas" energias.

Um aspecto da vida económica e social que requere mudanças é o da regularidade nos usos da energia. O

sucesso de algumas políticas tarifárias mostrou como é possível, e até fácil, adaptar os consumos às conveniências produção.

Todavia, ignorando largamente a facilidade apontada, o sistema económico e a vida social têm-se ordenado segundo calendários e horários rígidos e repetitivos ligados aos movimentos anual e diário da Terra. Não se modulam no tempo os usos da energia consoante os ritmos naturais da sua afluência.

A necessidade de evitar desperdícios quer de energia, quer de capital, vai, provavelmente impor a adaptação dos horários de trabalho e dos ritmos da produção aos ritmos dos fluxos naturais da energia. Essa adaptação pratica-se, desde sempre, nas actividades agrícolas; no futuro virá, talvez, a ser praticada na indústria e nos serviços.

* * *

Esboçou-se um quadro tecnológico que parece adaptar-se a muitos dos condicionamentos que rodeiam o aproveitamento das energias "novas". Dentro deste quadro merece uma atenção algo mais minuciosa a via fotovoltáica.

Nenhuma outra das técnicas actualmente conhecidas permite obter energia eléctrica a partir da radiação solar com rendimento tão elevado como o que as células fotovoltáicas já permitem (ver fig. 1). É certo que por limitações quânticas não é possível converter em energia eléctrica a totalidade da radiação incidente. Todavia o limite teórico do rendimento da conversão fotovoltáica anda por 45% e nada leva a pensar que seja impossível aproximarmo-nos deste limite, triplicando o rendimento das células hoje disponíveis.

Não é fantasia sem algum fundamento admitir que se generalizará a instalação de painéis fotovoltáicos sobre as coberturas dos edifícios e que esses painéis serão ligados à rede eléctrica nacional através de pontes onduladoras. Os consumidores seriam debitados pela energia absorvida à rede e creditados pela energia fornecida à rede pelos painéis de que fossem proprietários. (Ver nota final).

A comparação das densidades superficiais com que a energia veiculada pela radiação solar aflui (mesmo tendo em conta os baixos rendimentos de conversão que hoje se obtêm) e das densidades com que a energia eléctrica é usada (ver Quadro III) mostra que o balanço energético anual pode ser largamente favorável aos proprietários dos painéis solares. Um obstáculo importante opõe-se ainda a que esta tecnologia contribua para aliviar fortemente as dificuldades com a energia: o custo elevadíssimo dos painéis fotovoltáicos.

Parece que nenhuma impossibilidade básica se opõe a que o custo dos painéis fotovoltáicos desça espectacularmente. A realidade, contudo, é que o custo da unidade de energia obtida por via fotovoltáica ainda é muito superior ao que permitirá oferecê-la em concorrência com a energia proveniente de outras fontes.

* * *

A necessidade de reduzir o custo dos conversores fotovoltáicos e de melhorar o seu rendimento é um bom exemplo do interesse que tem o conhecimento da "Ciência dos Materiais" para a obtenção de energia. Num quadro circunscrito ao mundo energético recorda-se que progressos nas pilhas de combustível, nos conversores termoeléctricos e termoiónicos, na magnetohidrodinâmica, no aumento da temperatura da fonte quente das máquinas térmicas, dependem dos progressos no conhecimento da física da matéria.

* * *

A visão prospectiva que se expôs descrevendo como a longo prazo poderão evoluir algumas das tecnologias da energia eléctrica, pode ajudar a modelar o ensino do Ramo "Energia e Electrónica" do curso de Engenharia Electrotécnica. No Instituto Superior Técnico os programas estão a inflectir tendo em conta as evoluções que se descreveram.

Junho de 1982

No texto referem-se as seguintes fontes:

[1] — "Projecto UTL — Energia" — edição da Reitoria da Universidade Técnica de Lisboa; 1981, Lisboa.

[2] — "A procura de energia em Portugal — Quadros alternativos" — Direcção Geral de Energia e Grupo de Estudos Básicos de Economia Industrial, 1980, Lisboa.

[3] — **Poincaré, Lucien** — "L'Électricité" — —Flammarion, 1918, Paris.

[4] — **Moura, Domingos et al.** — "O que é a energia nuclear — Oportunidade em Portugal" — Moraes editores, 1978, Lisboa.

[5] — **Moura, Domingos** — "Reflexões sobre a eventual encomenda, em 1977, de uma central nuclear para Portugal" — in **Técnica**, n.º 442, 1977, páginas 551-566.

[6] — **Skrotzki, Vopat** — "Power station engineering and economy" — McGraw Hill, New York, 1960.

Nota final — No dia 16 de Fevereiro de 1983, no Laboratório de Máquinas Eléctricas do Instituto Superior Técnico, ligou-se um painel com células fotovoltaicas directamente à rede pública, através de uma ponte onduladora trifásica. Usando linguagem algo imaginativa poderá dizer-se que se ligou o Sol directamente em paralelo com a rede da EDP.

TELECOMUNICAÇÕES princípios fundamentais(*)

M. ABREU FARO, Professor do IST

SUMÁRIO: Passados 150 anos sobre o telégrafo electromagnético e mais de um quarto de século sobre a explosão da Teoria da Informação entende-se oportuna uma meditação sobre estes factos.

O mesmo é dizer-se uma reflexão sobre o modo como as Telecomunicações evoluíram desde o Telégrafo de Morse até aos dias de hoje, em meios e conceitos do processo informativo.

Ao fazê-lo fomos necessariamente sintéticos apenas aflorando o essencial: a dimensionalidade do sinal, a medida de informação, o teorema da amostragem e a quantificação no actual contexto das telecomunicações guiadas e das ligações hertzianas.

Estamos convictos que o avanço no domínio das Telecomunicações marcará este século, o que implicará uma filosofia do melhor aproveitamento de um processo que se deseja.

SINAIS — O recurso a sinais pré-estabelecidos integrados num determinado código constitui o princípio primeiro do domínio da Engenharia que são as Telecomunicações.

Nos processos contemplados a semântica está ausente e os sinais e suas sequências são analisadas numa atitude puramente sintéctica.

Assim é nas telecomunicações de que nos ocuparemos. Não quer dizer que o seja sempre e para o futuro no mundo mais vasto da Cibernética.

Reduzimos assim os problemas de semiótica que se constituiu hoje numa ciência e técnica de pesquisa do modo como funcionam a comunicação e a significação [1].

Um processo de comunicação em que não preexista um código é simplesmente um processo de estímulo-resposta [1].

Nessa atitude, sinal não é qualquer agente de comunicação mas sim uma coisa que está por outra. Essa correspondência que é biunívoca, e reversível, resulta exactamente de uma convenção que é o código [1], [2].

Nessa convenção, se S_1 é sinal de E_1, E_1 é necessariamente assinalado por S_1.

Quando assim sucede, além de um processo de comunicação observa-se também um processo de significação.

Precisando deste modo, significar é exactamente um "signum facere", intencional, tentando uma comunicação através de um dado código.

As telecomunicações de que nos ocupamos são, pois, telesignificações.

Os sinais S_1, S_2... S_n representantes das entidades E_1, E_2... E_n, podem assumir diversas formas significantes o que é próprio e característico do código concebido.

Temos, por exemplo, as combinações dos Pontos e Traços do Código Morse.

Temos, por exemplo, as 32 sequências de um código binário de cinco unidades: Código Baudot.

Escrever cartas em código pode ter interesse criptográfico mas é, no tempo, um sistema ineficiente no que respeita ao tráfego de mensagens.

Se um sinal físico assinalar um sinal gráfico, se esse sinal físico for célere e caminhe por si num determinado meio, então sim, encontramos um sistema interessante de significar.

Este o princípio básico de todos os telégrafos primitivos, dos antigos semáforos, do telégrafo electromagnético de Morse.

Este foi concebido em 1832.

Em 1831 Farady tinha descoberto a Lei de Indução.

(*) *Lição síntese proferida no âmbito do Departamento de Engenharia Electrónica por ocasião dos 70 anos do Instituto Superior Técnico por* **M. de ABREU FARO**, *prof. IST.*

Foi o electromagnete que motivou Morse, um artista americano de visita à Europa.

Com pontos e traços Morse concebeu um código. Ao ponto fez corresponder um sinal eléctrico de amplitude constante e duração τ, ao traço uma duração 3τ, pontos e traços estavam separados por intervalos, na emissão, de duração τ.

A cada letra do alfabeto fez corresponder uma sequência de traços e pontos; entre letras o intervalo é de 3τ; entre palavras a pausa é maior: 4τ ou 5τ.

O tempo de codificação física de uma letra depende da sequência de pontos e traços correspondente.

O E que é a letra mais frequente da língua inglesa foi codificado por um simples ponto ou seja pela unidade sígnica de menor duração.

Morse seguia já boas regras de codificação mas a Teoria da Informação estava ainda num futuro distante, mais de um século.

OS PROCESSOS FUNDAMENTAIS — Morse não foi exactamente o primeiro a conceber o telégrafo electromagnético, quem primeiro o construiu foi Joseph Henry (1831-1832).

Morse está, no entanto, ligado ao código e ao sistema que foi aperfeiçoando com a ajuda de Gale, Henry e Vail.

Steinheil tinha descoberto que a terra podia ser utilizada como condutor de retorno.

A primeira mensagem telegráfica foi transmitida por Samuel Morse em 24 de Janeiro de 1838, linha de 10 milhas.

O serviço telegráfico inicia-se em 1843-1844 numa ligação Washington-Baltimore.

A partir de 1845 a América e a Europa foram-se enriquecendo, aqui e ali, com linhas telegráficas.

Gauss e Weber e Steinheil pelos anos 30 propuseram, com independência, codificações binárias. Também os dois primeiros conceberam um sistema utilizando um único fio e um galvanómetro detector.

Em 1857 e 1865 tentou-se a ligação transcontinental por cabo submarino.

Em 1866, o organizador Cyrus Field, consegue finalmente o que, então, era uma tarefa gigantesca.

Um grande navio, o Great Eastern, com 2.400 milhas de cabo pesando 4.000 toneladas, em vinte dias unia os dois continentes.

William Thomson, Lord Kelvin, foi o físico que assistiu nesta tarefa em que para a última ligação se utilizou o galvanómetro de sua invenção [3].

A partir de 1866 a América e a Europa estavam efectivamente ligadas por cabo submarino. Numa primeira experiência já o tinham estado durante dois meses, em 1858.

Em 1855, Lord Kelvin, calculou a resposta de uma linha telegráfica a um impulso. Em 1873 introduz uma inovação importante, utilizando impulsos dipolares de igual duração com correspondência com o "ponto" e o "traço" do código Morse. Assim se melhorou a resolução e a velocidade de transmissão.

Ainda em 1884, publica um trabalho sobre o tempo de transmissão no cabo submarino, embora polémico levantou conceitos e questões básicas [4].

Entretanto, 1864, Maxwell apresenta à Royal Society a memória "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" onde a essência das suas ideias já está presente [5].

Entre 1865 e 1981 Maxwell consolidou a obra concebida dando corpo ao tratado sobre Electricidade e Magnetismo publicado em 1873.

As ondas electromagnéticas previstas na Teoria de Maxwell, foram evidenciadas experimentalmente por Hertz, 1887-88, que também elaborou uma teoria completa do dipolo oscilante, gerador e irradiador dessas ondas: Die Krafte electrischer Schwingungen behandelt nach der Maxwellschen Theorie, Ann. Physik (1889).

Assim nasceu a primeira antena: o Dipolo Eléctrico de Hertz.

O Dipolo Eléctrico de Hertz e o seu dual, Dipolo Magnético de Hertz, são elementos essenciais no estudo da radiação das ondas Electromagnéticas.

Entre 1876-1899,nasce, cresce e consolida-se a telefonia: telefone de Alexander Graham Bell, a primeira estação de comutação em New Haven, oito linhas (1878), o microfone de grenalha de carvão de Hughes (1888).

Na Inglaterra, Strowger concebe a comutação automática através de um sistema passo a passo(1887).

Em 1893 trabalhos importantes de Heaviside conduzem à teoria do cabo carregado que tendo em vista diminuir a atenuação acabou por ser posta em prática por Pupin (1900) e noutra concepção por Krarup.

São a todos os títulos fundamentais os trabalhos de Heaviside sobre o cálculo operacional, teoria dos circuitos e propagação guiada por linhas (1892-1899).

Em 1887, como se disse, Hertz gera no laboratório as ondas electrómagnéticas previstas por Maxwell, detecta-as (ressoador de Hertz) e evidencia todas as propriedades características das ondas: radiação, reflexão e refracção.

EM 1894, Marconi, tendo tomado conhecimento dessas experiências, repete-as a amplia o alcance da emissão incorporando no oscilador de Hertz uma antena semelhante às que Popov (1893) utilizava no detecção de descargas atmosféricas.

Isso foi decisivo e, então, formula um problema concreto.

Utilizar as ondas hertzianas nas comunicações.

As primeiras experiências conclusivas em radiotelegrafia datam de 1897: experiências de Lavernock.

Marconi utiliza as potencialidades da sintonia já evidenciada em 1889 por Lodge. Cumpre referir os trabalhos de Popov concebendo a antena detectora.

No princípio deste século, Dezembro de 1901, Marconi consegue estabelecer a ligação da Europa, à América, via rádio. É coberta uma distância de 3500 Km.

O ESPAÇO DAS TELECOMUNICAÇÕES — As experiências de Hertz dificultaram a interpretação teórica dos resultados de Marconi: num meio homogéneo as ondas electromagnéticas propagar-se-iam em linha recta.

Falava-se de uma montanha de mar que teria que ser trespassada pelas ondas electromagnéticas. Assim, a curvatura da terra tornava inexplicável uma ligação de

tão grande porte, simplesmente processada na atmosfera.

Em 1902, a bordo do Philadelphia, Marconi, afastando-se progressivamente da Inglaterra, vai recebendo sinais nítidos durante o dia e ainda melhores durante a noite.

Assim descobria aquilo que tão simplesmente designou por "night effect".

Registando com escrito testemunho a recepção de sinais que viera captando desde a Inglaterra, foi acreditado.

Ainda em 1902, Heaviside e Kennely postularam a existência de uma "camada condutora" na alta atmosfera onde as ondas electromagnéticas se reflectiríam. Isso explicaria os resultados de Marconi.

Só em 1924-25, Appleton e Barnett procederam a experiências concludentes e esclarecedoras sobre a natureza dessa camada: tratava-se da ionosfera, na linguagem de hoje de um plasma, na realidade um magnetoplasma imerso que está no campo magnético da Terra.

Entretanto, fiel aos seus objectivos, Marconi continuava a trababalhar e em 1905 introduz um avanço importante: a antena direccional.

Até 1901 tudo tinha sido feito sem a Electrónica que entra em cena em 1904 com a descoberta do díodo por Fleming.

Em 1907 Lee De Forest inventa o tríodo (Audion).

Assim se torna possível a amplificação electrónica e a decorrente concepção de osciladores electrónicos.

Marconi reconhece em 1922 que o êxito conseguido com as ondas longas e médias tão grande tinha sido que as potencialidades das ondas curtas tinham sido menos aproveitadas.

No entanto, essas ondas, ondas decamétricas, eram agora acessíveis graças ao espectacular desenvolvimento que a Electrónica registou após a Primeira Grande Guerra.

Esta meditação levou-o a estudar experimentalmente e de modo sistemático as radiocomunicações em onda curta: fê-lo num barco seu transformado em verdadeiro laboratório, o "Elletra I" [6].

Sem grande teoria, por intuição e pesquisa experimental intensa, finalmente, conclui:

A qualquer hora do dia, entre dois pontos à superfície terrestre, qualquer que seja a distância, é sempre possível uma ligação hertziana desde que criteriosamente se proceda à selecção da frequência de trabalho.

Estes trabalhos culminam com o êxito da ligação telefónica Inglaterra-Austrália (Poldhu-Sidney), estava-se em maio de 1924:

Linhas, cabos, cabos submarinos, ligações hertzianas por onda superficial e ligações hertzianas via ionosfera eram e constituiam o espaço das telecomunicações de então.

Durante a Segunda Grande Guerra observaram-se progressos notáveis no domínio das microondas, muito particularmente no que se ligou ao desenvolvimento do Radar.

Depois da guerra o desenvolvimento prosseguiu e a importância das ligações em linha de vista ganhou crescente interesse. tratava-se de um sucedâneo do cabo coaxial e era de importância fundamental para a interligação das estações radiodifusoras da Televisão. Assim nasceram os feixes hertzianos.

Em 1945, A.C. Clarke propunha uma extensão dos sistemas repetidores terrestres utilizando satélites geoestacionários.

Em 1955 J.R. Pierce propõe mais concretamente sistemas de telecomunicações utilizando satélites.

Em Outubro de 1957 é lançado o primeiro satélite artificial: o Sputnik.

Em Julho de 1962 foi lançado o Telstar que foi o primeiro satélite activo a dispor de um repetidor de banda larga.

Em Fevereiro de 1963 foi lançado o primeiro satélite geoestacionário, Syncom, mas a experiência falhou.

Em Julho de 1963 é lançado o segundo Syncom e colocado na órbita prevista.

Em 1965 é lançado o Intelsat I, (Early Bird), em 1967 o Intelsat II e (mais tarde) outros se seguiram.

Os satélites geoestacionários são colocados em órbitas equatoriais circulares e síncronas com 42.000 Km de raio e, portanto, a uma altitude de cerca de 35.800 Km, no Equador.

O satélite tem uma visibilidade que cobre 40% da superfície terrestre. Um sistema internacional completo exige, portanto, um mínimo de três satélites angularmente separados de 120°.

Assim se fez e assim acontece com os satélites que foram, e em número diverso, colocados sobre o Atlântico, o Índico e o Pacífico.

A ionosfera era um sistema passivo com perdas que garantia um retorno por refracção.

Utilizando a camada F um salto representa uma distância máxima de 4.000 Km à superfície da Terra. Usando a camada E o salto é de 2000 Km.

Veja-se pois como o espaço das telecomunicações se alargou com a introdução dos satélites.

Com a Electrónica de hoje, neste Espaço, tudo quanto se imagine ganha uma realidade quase certa.

Entre o telégrafo de Morse e os dias de hoje decorreram cerca de 150 anos e nesse período construiu-se o espaço descrito: primeiro por instinto, aproveitando pragmaticamente o que a Ciência e Tecnologia iam facultando, a partir de 1920-30, a partir daí, já não foi bem assim, disso nos ocuparemos a seguir.

DIMENSIONALIDADE DO SINAL — Durante quase um século, 1830-1920, as Telecomunicações desenvolveram-se de modo pragmático, utilizando os sinais mais rápidos, os electromagnéticos, incorporando a fenomenologia e resultados da ciência contemporânea: primeiro a do Campo Electromagnético; mais tarde, já neste século, a da Electrónica.

As comunicações dos anos 1920-30 são já uma realidade forte, no entanto, a teoria abstracta dos sinais apenas tinha sido aflorada.

Os sinais estavam fortemente confundidos com os processos tecnológicos e realidade física em que se suportavam.

Ainda não se tinha entrado numa fase analítica do

sinal e dos sistemas e muito menos numa fase sintética.

Entre outros podem considerar-se fundamentais e precursores da modernidade os trabalhos de E.H. Colpitts e O.B. Blackwell (1921), J.R. Carson (1922), R.V. Hartley (1923) e H. Nyquist (1924).

Nesse contexto já se fala claramente da Teoria da Modulação — Carson (1922) — e decorrentemente de portadora e bandas laterais.

Nyquist em 1924 e 1928 e Hartley em 1928 já abordaram numa atitude moderna o problema da velocidade de transmissão de sinais telegráficos.

Hartley já utiliza o conceito de quantidade de informação não exactamente como Shannon mas anda próximo: formalmente há uma certa identificação, conceptualmente não.

Assim, sem prejuízo de intuições mais remotas onde avultam os trabalhos de Lord Kelvin e Heaviside é a partir dos anos 20 que os sinais começam a abstrair-se dos processos físicos em que se suportam o mesmo acontecendo com os sistemas que processam esses mesmos sinais.

* * *

Inicialmenteo sinal foi tomado como uma forma, f(t), descrita na variável tempo.

O ressoador de Helmholtz, a sintonia evidenciada por Lodge, as limitações introduzidas pela pupinização os trabalhos de Carson, Nyquist e Hartley devem ter contribuído, talvez, para a formação do conceito de frequência na acepção em que é tomada na análise espectral.

Assim diremos que à função f(t) suportada e durando na variedade t corresponde uma densidade $F(\omega)$ suportada na variedade ω.

$F(\omega)$ é o integral de Fourier de f(t) e f(t) a transformada inversa.

A partir daqui a realidade objectiva, sinal, tanto pode ser descrita na variável natural t como na variável associada ω.

Correntemente a densidade espectral, $F(\omega)$, é simplesmente designada por espectro ainda que incorrectamente.

Para conhecer $F(\omega)$ é preciso conhecer toda a história no tempo de f(t).

Para reconhecer f(t) é necessário conhecer toda a descrição de $F(\omega)$ na frequência.

A Teoria das Funções Generalizadas, Teoria das Distribuições, permite hoje a análise de Fourier de determinados sinais que até ao estabelecimento dessa teoria apenas podiam ser tratados numa base de intuição física. É o caso, por exemplo, da "função de Dirac".

Nesta ordem de ideias o espectro de uma função de Dirac, $\delta(t)$, é de módulo constante em toda a variedade ω.

O espectro da $\exp(j\omega_0 t)$ é uma função de Dirac em ω localizada em ω_0: $\delta(\omega-\omega_0)$.

Isto significa que um instante pode ser assinalado por uma função de Dirac no tempo mas exige a comparticipação de todas as frequências por igual.

Significa que uma função sinusoidal que é periódica e não localizada no tempo, assinala, no entanto, no domínio da frequência, $f=\omega/2\pi$.

A transformada de f(t) $\exp(j\omega_0 t)$ é $F(\omega-\omega_0)$ e este resultado é a base fundamental das radiocomunicações e dos métodos de divisão de frequência (FDM).

Consideremos um sinal de duração significativa Δt_1.

Então se, mantendo a forma, a duração passar para Δt_2 resulta do integral de Fourier que Δf_2 fica definida pela relação: $\Delta t_1 \, \Delta f_1 = \Delta t_2 . \Delta f_2$.

Note-se que os suportes efectivos, Δf e Δt, podem ser definidos, por critérios arbitrários mas objectivos aplicados às formas f(t) e $F(\omega)$.

Conclusão: Numa base de conservação da forma a dimensionalidade do sinal é um invariante no espaço tempo-frequência: $\Delta t \, \Delta f$=const.

Pode pôr-se a questão de averiguar em que medida um sistema altera uma forma $F(\omega)$ e assim nasceu o conceito de filtro e os conceitos associados de banda passante e função de transferência.

Pode pôr-se um problema idêntico relativamente à forma f(t), o que nos conduz ao conceito de resolução, no tempo, de um dado sistema e ao conceito de resposta ao impulso unitário.

Também numa base de conservação da forma se pode demonstrar que num dado sistema $\Delta f_B . \Delta t_R$=const. em que Δf_B é a largura de banda e Δt_R o tempo de resolução.

Tudo isto se consubstancia no seguinte princípio fundamental, aplicável a sinais e a sistemas, respectivamente:

— A duração no tempo e a ocupação espectral variam inversamente em relação a uma dada forma.

— A resolução no tempo e a largura de banda dum dado sistema também variam inversamente.

A segunda afirmação é corolário da primeira uma vez que a função de transferência está ligada à resposta ao impulso unitário, no tempo: a função de transferência é o integral de Fourier da resposta ao impulso unitário.

Neste facto e no princípio da causalidade se radica o Teorema de Paley-Wiener sobre a realizabilidade de filtros.

A TEORIA DA INFORMAÇÃO — Em 1948 Claude Shannon deu a conhecer "A Mathematical Theory of Communication". Aí se introduzem os conceitos fundamentais da actual Teoria da Informação o que se inicia com a definição da quantidade de informação recebida por quem toma conhecimento de um acontecimento de probabilidade "a priori" p: $Q = -\log_2 p$ [bit].

Isto pressupõe um postulado, ausência de ruído.

Se este existir, e existe, subsistirá sempre, e em certa medida, dúvida se o primeiro sinal e na base de um dado código, nos chegou sem alteração. Só na ausência do ruído e dessa eventual perturbação haveria certeza na descodificação.

Shannon desenvolveu uma estratégia que interessa todo o sistema, desde a emissão à recepção.

A Fonte de Informação é estimada na base da quantidade de informação que, em média, gera na unidade de tempo.

Entre a Fonte de Informação e o canal de Informação insere-se o Centro Codificador e a codificação permite resolver os seguintes problemas essenciais:

— Adaptação da linguagem da fonte à linguagem do canal.

—Eliminar a natural redundância das fontes.

— Resistir à deterioração que o ruído introduz, permitindo reduzir o número de erros a um número arbitrariamente pequeno.

Resumidamente, pode dizer-se que a Teoria da Informação confere às comunicações um carácter probabilístico e dispõe de teoremas que permitem afirmar que o êxito de uma comunicação é um acontecimento quase-certo desde que se jogue convenientemente com os parâmetros que conferem dimensionalidade à Quantidade de Informação e ao Canal de Informação.

O canal afere-se pela máxima quantidade de informação que um dado canal pode transmitir.

A máxima quantidade de informação que o canal pode transmitir na unidade de tempo designa-se por Capacidade do Canal.

Todos os trabalhos que convergiram para a Teoria da Informação assentam no seguinte considerando básico:

Reconhecimento da acção condicionante do ruído que não é essencialmente diferente do sinal.

Sinal e ruído convivem e qualquer dos dois tem carácter aleatório.

Extrair de modo sistemático o sinal do ruído é pois o problema fundamental:

Kolmogorov, Wiener e Kotelnikov e mais recentemente Kalman e Bucy conceberam filtros adequados à extracção do sinal do ruído. É matéria actual e em permanente evolução na Teoria do Reconhecimento de Formas.

No entanto, foi Shannon que estabeleceu uma teoria **integral da comunicação, em que a separação do sinal do ruído está sempre presente desde a codificação até à** descodificação.

Nestes termos, num sistema de comunicação distinguem-se os seguintes órgãos fundamentais: Fonte de Informação - Centro de Codificação - Canal de Informação - Centro de Descodificação - Destinatário:

O agente activo é sempre o sinal que na base de um código promove representações unívocas "the semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering aspects" (Shannon).

TEOREMA DA AMOSTRAGEM — Na sua teoria matemática da comunicação Shannon trata os sinais discretos e os sinais contínuos, os primeiros são típicos da telegrafia, os outros intervêm na fonia e em qualquer outro sistema que processe formas que sejam funções contínuas do tempo.

Pode pôr-se a questão de saber se é possível interpolar a função f(t) a partir do seu conhecimento em instantes discretos t_1, t_2...

À luz do que já se sabia a resposta é não.

De facto, haverá sempre a possibilidade de omitir entre dois instantes consecutivos um pormenor de suporte limitado no tempo.

Mas um suporte limitado no tempo significa um espectro ilimitado no domínio da frequência.

Deste modo, tratando-se de uma função f(t) de espectro limitado essa possibilidade não é de excluir.

No domínio da Matemática a questão foi tratada por Whittaker em 1915 e retomada em 1935.

No entanto, deve-se a Shannon a interpretação física do teorema da amostragem em todas as suas consequências: amostragem discreta e reconstituição do sinal, função contínua do tempo.

Também Kotelnikov e com independência chegou aos mesmos resultados.

Concretamente trata-se do seguinte:

Uma função f(t) de espectro limitado á banda [o,F] pode ser reconstituída exactamente a partir de uma amostragem feita com a frequência de repetição 2F.

Levanta-se uma vez mais o problema de que uma função f(t) só pode ser de espectro limitado se for de suporte ilimitado no tempo.

No entanto, para $T \gg 1/2\ F$ podemos falar e tratar como tal as funções de duração T.

Amostrando com frequência 2F durante o tempo T obtêm-se 2FT dados.

Admitindo que a mesma forma decorria mais lentamente então a duração seria KT e a frequência limite do espectro F/K: o produto mantém-se constante.

Chegamos assim à conclusão que na base da conservação da forma o número de dados independentes é invariante e dado por $2\ F_1\ T_1 = 2\ F_2\ T_2 = \ldots$ em que T_2, T_2... representam os diversos tempos de transmissão da mesma forma.

Confirma-se assim o conceito da dimensionalidade do sinal, tomado como forma.

Este númerom 2FT, já tinha sido obtido por Gabor em 1946.

Considerou uma função de duração T e analisou-a em série de Fourier; a frequência da fundamental é 1/T e, portanto, o número de harmónicas na banda F é FT. Mas a série é em senos e cosenos e assim o número de dados independentes é 2 FT.

A Mathematical Theory of Communication de Shammon foi publicada em Julho e Outubro de 1948 no B.S.T.J.

Em Novembro de 1948 Oliver, Pierce e Shannon publicam no P.I.R.E. "The Philosophy of P.C.M." e em Janeiro de 1949 e também no P.I.R.E. Shannon publica Communication in the Presence of Noise.

PCM significa Pulse Code Modulation e a ideia já tinha sido patenteada por A.H. Reeves em 1939 (França) e 1942 (International Standard Electric Corporation). Deste assunto nos ocuparemos a seguir.

Quanto interessa no trabalho de Shannon é, como sempre, o enquadramento da questão numa perspectiva teórica e no âmbito da Teoria da Informação.

O trabalho de Janeiro de 1949 é verdadeiramente a primeira apresentação do Teorema da Amostragem aplicado às comunicações.

Utilizando o teorema da amostragem, Shannon aborda os sinais contínuos numa nova atitude: uma função de duração T e espectro limitado na banda [o,F] é representada num espaço de 2FT dimensões através das amplitudes amostradas em 2FT instantes.

O Teorema da Amostragem é a base teórica da Comunicação por Impulsos e de algumas aplicações importantes das Séries no Tempo [7] [8] [9].

A expressão analítica do teorema da amostragem é a seguinte:

$$s_F(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_F(t_n) \frac{\text{sen } 2\pi F (t-t_n)}{2\pi F (t-t_n)}$$

em que $s_F(t)$ significa função de espectro limitado na banda [o,F] e $t_n = \tau + \frac{n}{2F}$ os instantes de amostragem, é uma grandeza arbitrária.

A CAPACIDADE DO CANAL CONTÍNUO — Utilizando o teorema de amostragem Shannon estabeleceu um resultado importante para o canal contínuo afectado por ruído branco e gaussiano.

Ruído branco e gaussiano significa que as amplitudes amostradas do ruído, n_1, n_2... n_2 FT, são independentes e que cada uma se rege de per si por uma distribuição gaussiana.

A partir do teorema da amostragem pode demonstrar-se que as "potências" do sinal e do ruído são

$$S = \frac{1}{2FT} \sum_{n=1}^{2FT} s_n^2 \qquad N = \frac{1}{2FT} \sum_{n=1}^{2FT} n_n^2$$

basta atender à ortogonalidade das funções intervenientes no Teorema da Amostragem.

Pelas suas características, sinal e ruído são funções ortogonais do tempo pelo que a potência do sinal + ruído é dada por S + N.

A partir daqui Shannon determina o número máximo de sinais que de modo quase-certo poderá distinguir na convivência sinal + ruído. É dado por

$$N_{max} = \frac{\text{Volume da esfera de raio } \sqrt{2FT(S+N)}}{\text{Volume da esfera de raio } \sqrt{2FTN}} = \left(\frac{\sqrt{2FT(S+N)}}{\sqrt{2FTN}}\right)^{2FT}$$

em que 2FT traduz a dimensionalidade do espaço tempo-frequência e $R_{(S+N)} = \sqrt{2FT(S+N)}$ e $R_N = \sqrt{2FTN}$ os raios associados a grandezas de "potências" (S+N) e (N), respectivamente.

Por definição, a quantidade de informação que se recebe relativamente ao sinal [s_1, s_2... s_{2FT}] duração T e processado na largura de banda [o,F] será

$$Q\left(F,T,\frac{S}{N}\right)_{max} = -\log_2 \frac{1}{N_{max}} = FT \log_2 \left(1+\frac{S}{N}\right)$$

em que S/N traduz a relação sinal-ruído.

Para outro tipo de ruído o resultado não se aplica mas é possível estabelecer limites superior e inferior de $Q(F,T,\frac{S}{N})$ max.

No entanto, a assência dos factos é a mesma e assim podemos utilizar para essa finalidade a expressão associada ao ruído branco e gaussiano

$$Q\left(F,T,\frac{S}{N}\right)_{max} = FT \log_2 \left(1+\frac{S}{N}\right)$$

que nos mostra que através de um canal com ruído é possível transmitir de modo quase-certo (probabilidade de erro arbitrariamente pequena) uma dada quantidade de informação desde que se jogue, convenientemente, com a duração T de utilização do canal, com a largura de banda F e relação sinal-ruído.

Este resultado traduz o limite superior de uma possibilidade mas não esclarece de modo prático como esse limite pode ser atingido.

Dividindo Q por T obtém-se a capacidade do canal contínuo

$$C = F \log_2 \left(1+\frac{S}{N}\right)$$

QUANTIFICAÇÃO — PCM — O sistema PCM (Pulse Code Modulation) é aquele que, dos conhecidos, mais aproxima o sistema ideal.

Consideremos um dado sinal $s_F(t)$ que pode ser amostrado em 2FT amplitudes.

Podemos quantificar cada uma destas amplitudes em N_n níveis equidistantes de Δ.

As amplitudes S_F (t) compreendidas entre 0 e Δ serão tomadas como $\frac{\Delta}{2}$, as compreendidas entre Δ e 2Δ com $3\frac{\Delta}{2}$, etc.

Admitindo um sistema simétrico em que as amplitudes de s_F (tn) variem entre +A/2 e dispondo de N_n níveis de quantificação teremos $A = \Delta N_n$

É com estas amplitudes quantificadas que o canal trabalha, é isso que caracteriza o canal do sistema PCM.

Procedendo assim, introduzimos uma alteração inicial que jamais se poderá corrigir. De facto, substituímos as amplitudes $s_F(t_n)$ pelas amplitudes quantificadas.

Esta alteração designa-se por ruído de quantificação e a sua potência é -

$$N_Q = \frac{\Delta^2}{12} = \frac{1}{12}\left(\frac{A}{N_n}\right)^2$$

Admitindo que $s_F(t_n)$ tem uma distribuição uniforme de amplitudes então a potência do sinal é $S_F = \frac{A^2}{12}$ e então

$$\frac{S_E}{N_Q} = N_n^2$$

Assim obtivemos a relação sinal-ruído de quantificação.

Vejamos agora o que se passa no canal.

É fácil demonstrar que a potência do sinal no canal é

$$S_C = \frac{N_n^2 - 1}{12} \Delta^2$$

A fim de que o ruído não altere uma amplitude quantificada será necessário que $\Delta/2 = K\ \sigma_n$ em que σ_n^2 é a variância do ruído gaussiano.

Admitindo a hipótese ergódica teremos: σ_n^2 = média no conjunto = N_C = média no tempo, onde N_C é a potência do ruído no canal.

A probabilidade de erro pode tornar-se arbitrariamente pequena para K suficientemente grande.

É sempre possível eleger um valor de K para o qual a descodificação correcta de um nível é um acontecimento quase certo.

Sendo assim, a quantidade de informação transmitida pelo canal-PCM será

$$Q_{PCM}\left(FT\,\frac{S_c}{N_c}\right) = 2FT\,\log_2 N_n$$

Da expressão de Sc e atendendo ao facto de $\Delta = 2K\sqrt{N_c}$ facilmente se obtém

$$N_n = \sqrt{1 + \frac{12}{4K^2}\,\frac{S_c}{N_c}}$$

de onde resulta

$$Q_{PCM}\left(F,T,\frac{S_c}{N_c}\right) = FT\,\log_2\left(1 + \frac{12}{4K^2}\,\frac{S_c}{N_c}\right)$$

o que é formalmente semelhante à expressão obtida para o canal ideal:

$$Q_{Ideal}\left(F,T,\frac{S_c}{N_c}\right) = FT\,\log_2\left(1 + \frac{S_c}{N_c}\right)$$

Para um dado K, $\frac{S_c}{N_c}$ será tanto menor quanto menor for o número de níveis, N_n.

Resulta daqui que o PCM mais vantajoso será o binário, $N_n = 2$.

Para o PCM binário simétrico teremos

$$\frac{S_c}{N_c} = K^2$$

Verifica-se um erro se para o nível $\Delta/2$ o ruído tomar no momento de decisão um valor n tal que $n + \frac{\Delta}{2} < o$ ou seja $n < -\frac{\Delta}{2} = -K\,o_n$

Verifica-se também um erro se para o nível $-\Delta/2$ o ruído tomar no momento de decisão um valor n tal que $n - \frac{\Delta}{2} > o$ ou seja $n > \frac{\Delta}{2} = K\,\sigma_n$

Em qualquer dos casos a probabilidade de erro é idêntica e pode assumir o valor

$$P_e = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{K} \epsilon^{-\frac{x^2}{2}}\,dx = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{o}^{K} \epsilon^{-\frac{x^2}{2}}\,dx$$

Para K > 3 já teremos muito aproximadamente

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi K}}\,\epsilon^{-\frac{K^2}{2}}$$

Destes resultados facilmente se determinam os seguintes valores:

K	1	2	3	4	5
(S_c/N_c)dB	0	6	9,5	12	14
P_e	$1{,}59.10^{-1}$	$2{,}3.10^{-2}$	$1{,}4.10^{-3}$	$3{,}3.10^{-5}$	$3{,}4.10^{-6}$

Utilizando um PCM binário assimétrico, níveis Δ e o, teríamos $\frac{S_c}{N_c} = 2K^2$ e há que juntar 6 dB ao valor correspondente ao PCM simétrico de níveis $\pm\Delta/2$.

Podemos agora sumarirar os resultados.

Consideremos um sinal s_F (t).

Admitamos que quantificamos as amplitudes em N_n níveis, isso significa uma relação sinal-ruído de quantificação $\frac{S_F}{N_Q} = N_n^2$.

Para N_n = 64, 128 e 256 níveis obtêm-se respectivamente relações de 36, 42 e 48 dB. Usando uma quantificação não uniforme estes valores podem melhorar-se [7].

A quantidade de informação associada ao sinal quantificado é $Q\,[F, T, N_n] = 2FT\,\log_2 N_n$.

Utilizando para a transmitir um PCM binário, teremos

$Q\,[F, T, N_n] = 2FT\,\log_2 N_n = 2\,F_c\,T_c\,\log_2 N_{nc} = 2\,F_c\,T_c$ uma vez que o número de níveis no PCM binário é dois, $N_{nc} = 2$, *e o número de erros se desprezou.*

Transmitindo em tempo real $T = T_c$ e então $F_c = F\,\log_2 N_n$ o que nos mostra que o canal binário exige maior largura de banda que o sinal s_F (t).

Se $N_n = 128 = 2^7$, cada amplitude do sinal dá origem a sequências de 7 impulsos binários, se N_n = 256 teremos sequências de 8.

A relação sinal-ruído de quantificação

$$\left(\frac{S_F}{N_Q}\right)_{dB} = 10\,\log_{10} N_n^2 = 10\,\log_{10}2\,.\,\log_2 N_n^2 =$$

$$= 20\log_{10}2\;\log_2 N_n = 20\log_{10}2\;\frac{F_c}{F} \simeq 6\,\frac{F_c}{F}$$

mostra-nos que no PCM a largura de banda é proporcional à relação sinal-ruído de quantificação.

Esta troca de relação sinal-ruído com largura de banda é uma propriedade importante dos sistemas de modulação no tempo, evidenciada com generalidade por Shannon. O PCM é o sistema prático que melhor promove essa troca. Em modulação de frequência e em sucessões de impulsos modulados no tempo a relação sinal-ruído é simplesmente proporcional ao logaritmo da largura de banda.

Utilizando um parâmetro de confiança K=5 o que equivale a uma relação sinal-ruído no canal de 14 dB teremos uma probabilidade de erro $P_e = 3{,}4.10^{-6}$.

Se usássemos um canal binário assimétrico [o, O] a relação sinal-ruído seria de 20 dB.

Admitindo um canal de fonia F=4000 Hz, e 256 níveis o canal PCM exige uma largura de banda Fc = 8.4000 = 32 000 Hz.

Numa conversa de 3 minutos e informação transmitida é $Q = 2\,F_c\,T_c = 2.32\,000.180 = 1{,}152.10^7$ bits e os erros observados serão provavelmente, 39 alterações de binários digitos num conjunto de 11,52 milhões de binários digitos.

Chegados a este ponto as possibilidades conceptuais das Telecomunicações de hoje podem resumir-se na relação

$$2FT \log N_n = 2F_c T_c \log_2 N_{nc}$$

em que o membro da esquerda traduz a quantidade de informação que durante o tempo T, arbitrariamente se extrai do sinal s_F (t) usando N_n níveis de quantificação e o membro da direita a capacidade de um canal PCM que de modo quase-certo utiliza N_{nc} níveis.

Em termos de relação sinal-ruído no canal, o PCM mais favorável é o binário simétrico o que significa dois níveis, $N_{nc} = 2, \pm \Delta/2$.

Um facto importante ressalta daqui: num dado continuum e antes que se atinja o limite da resolução física a informação que se obstrai de um sinal s_F (t) é arbitrária, depende do número de níveis em que se quantifica o sinal.

A relação sinal-ruído de quantificação dá-nos uma medida da indeterminação que medeia entre a forma que se reconstitui s_{FQ} (t) e o sinal S_F (t).

Por s_{FQ} (t) designa-se a função contínua de espectro limitado [o,F] reconstituível a partir de uma sucessão de amplitudes quantificadas.

A quantificação é pois a operação que se interpõe entre o sinal s_F (t) e o canal-PCM.

Do telégrafo de 1832 evoluímos até um novo telégrafo que através de sequências binárias transmite amplitudes quantificadas e, em última análise, a forma contínua s_{FQ} (t).

A dimensionalidade do sinal 2FT dá lugar à dimensionalidade da quantidade de informação 2FT $\log_2 N_n$ associável ao sinal s_F (t) no tempo T.

Isto ainda não é exactamente assim para todos os serviços em uso mas poderá ser sempre assim.

As implicações do PCM são pois profundas.

Uma amostragem uniforme, no tempo, prepara o caminho para uma comutação por divisão no tempo, esse é o futuro.

Em intervalos de tempo bem determinados uma via de banda larga aceita ou faculta séries cronológicas que nessa via entram ou dessa via saem.

A comutação por divisão no tempo é o futuro e representa uma revolução nos métodos convencionais dessa operação necessária e complexa que é a comutação.

CONCLUSÕES: Em matéria de programação guiada assiste-se ao crescente aumento da capacidade dos sistemas físicos: em 1940 os cabos garantiam 60 conversões telefónicas simultâneas.

Dos anos de 1950 até hoje normalizaram-se os seguintes sistemas coaxiais 1,3 MHz (300 vias), 4 MHz (960 vias), 12 MHz (2700 vias) e 60 MHz (10 800 vias).

Um circuito exige duas vias e assim os cabos coaxiais são colocados aos pares. Nos anos de 1975-80 desenvolveu-se um sistema múltiplo de 11 pares cada um dos quais com a capacidade de 10 800 circuitos.

Destes 11 pares, 10 são usados em fonia permitindo 10x10 800 = 108 000 conversas telefónicas simultâneas.

O sucedâneo da propagação guiada foi a radiação dirigida em linha de vista: feixes hertzianos.

No entanto, a atenuação agrava-se em presença da chuva e da neve. Há que contar com as riscas de absorção dos componentes da atmosfera.

Investiga-se nessa matéria, apuram-se as janelas existentes.

Existe especial interesse nas portadoras acima dos 10 GHz. Estão propostas bandas nos 18, 22 e 39 GHz.

Nos meados de 1975 foi lançado um sistema digital operando nos 18 GHz com estações repetidoras com a capacidade de canais de 2 vias e em que cada via drena 274 Mb/s. Sete são dedicadas a fonia e o sistema permite assim 28 224 conversações telefónicas simultâneas em PCM (No exemplo a seguir esclarece-se como se pode calcular o número de conversações telefónicas) [10].

Resumidamente podemos dizer que as ondas milimétricas representam o campo promissor do futuro.

As comunicações em infravermelho põem problemas mecânicos de vibração das lentes emissora e receptora.

As comunicações ópticas, laser, poderão ter interesse pela acessibilidade que permitem, por exemplo, nas zonas submersas do mar.

Seguidamente e a partir dos meados de 1970 (1975-80) são concebidos sistemas utilizando guias de secção circular, modo TE_{01}, que para um diâmetro da ordem de 6 cm permitem a utilização de uma banda de 40 a 110 GHz, a banda 40-75 respeita a um sentido e a banda 75-100 a outro.

Este sistema utiliza 60 portadores equidistantes de 550 MHz o que ocupa 33 GHz.

Cada portadora é modulada por um sinal digital múltiplo incluindo 4032 vias telefónicas usando quantificação em 256 níveis e PCM binário. Teremos assim 4032. (2.4250 Hz). 8 $\simeq$ 274,176 Mb/s admitindo uma frequência de repetição de 8500 Hz o que corresponde em fonia tomar, por prudência, F=4250 Hz.

Das 60 portadoras apenas 57 são utilizadas em fonia o que conduz a 57 x 4032 $\simeq$ 230 000 conversas telefónicas.

Pata a fonia e outras finalidades são transmitidos 274 M bit/s por cada portadora o que equivale a 274x60 M bit/s na banda efectiva de 33 GHz.

Fazendo o quociente $33.10^9/2{,}74x6x10^9$ obtem-se 2 Hertz/binário digito.

Nyquist demonstrou que para transmitir N dados independentes por segundo será exigida teoricamente uma largura de banda de N/2Hz.

É isso que se afirma quando se diz que um sinal de banda [o,F], amostrado ao ritmo 2F/seg., exige uma largura de banda F para transmitir as 2FT amplitudes.

Então para transmitir 274x60 M bit/s = 16,44 G bit/s seria necessária uma largura de banda mínima de 8,22 GHz.

O número efectivo de 33 GHz deve-se a dois factos, o primeiro porque na prática o ritmo actualmente em uso é cerca de metade do ritmo de Nyquist: isto significa que N dados/s exigem NHz.

A segunda razão é porque se usam portadores

moduladas com o aproveitamento das duas bandas laterais.

Trata-se de modulação binária de fase — PRK — que exige o mesmo que a modulação de amplitude, assim se chega a que N dados/seg exigem 2 NHz ou seja os 2 Hz/binário digito já encontrados.

A máxima atenuação teórica deste sistema observa-se na frequência mais baixa da banda(40 — 110) Hz e é da ordem de 1 dB/Km o que permite estações repetidoras afastadas de cerca de 40 km.

Num cabo coaxial de 4 MHz a atenuação em 4 MHz é cerca de 4,5 dB/Km o que exige estações repetidoras afastadas de 9 Km. No cabo de 60 MHz o afastamento previsto para as estações repetidoras é de 1,55 Km.

O guia ôco de secção circular é, portanto, um sistema de alta capacidade e baixa atenuação.

A sua implementação apenas dependerá da viabilidade económica de um sistema de tal porte.

Note-se que as 4032 vias, amostradas, quantificadas e passadas a PCM dão origem a sequências que se interlaçam no tempo, resultando os 274 M bit/s — trata-se do método de Divisão no Tempo que o Teorema de Amostragem permite — (TDM).

Chama-se a atenção para o facto do guia circular ter como dielectrico azoto sêco para evitar as riscas de absorção do ar húmido.

Em matéria de propagação guiada, sempre vantajosa na sua protecção contra a meteorologia e livre das riscas de absorção do ar, as fibras ópticas são hoje a realidade maior.

Já se produzem comercialmente fibras com atenuações de 1 a 4 dB/Km. Note-se que o vidro vulgar introduz atenuação da ordem de 5 dB/m.

Experimentalmente já se conseguiram fibras com atenuações inferiores a 1 dB/Km.

Neste momento existe a possibilidade física da construção de sistemas de fibras com uma capacidade de 1 bilião de bit por segundo.

A estes avanços em propagação guiada juntam-se as potencialidades associadas às diversas hierarquias de satélites, não só no que respeita à capacidade dos canais mas ainda aos sistemas de múltiplo acesso que uma rede de satélites permite garantindo fáceis interconexões entre estações terrestres.

A tudo isto juntam-se as possibilidades abertas pelas técnicas de LSI e VLSI (Very Large Scale Integration).

Estamos certos que as Telecomunicações, como tudo, estão condicionadas e em permanente intermotivação com a Tecnologia disponível.

Mas o Espaço das Telecomunicações é tão vasto que neste momento o factor primordial de avanço é o que se liga à capacidade de conceber em abstracto o que cria e define um domínio, diríamos, das Matemáticas Aplicadas.

Para a Física está também aberto um caminho ou pelo menos a averiguação de limites de resolução. Talvez se consiga nesse contexto de minúcia dsicreta estabelecer novos limites teóricos numa mesma Teoria da Informação e dar também resposta clara ao problema já equacionado do quantum mínimo de energia exigida pela transmissão de uma unidade de quantidade de informação.

À Engenharia competirá aproveitar numa base de juízos de realidade.

O avanço, no entanto, será de ordem tal que a Sociologia, em última análise a felicidade humana, serão tocadas e deverão pronunciar-se.

Seria estulta pretensão tentar travar a investigação, fechar caminhos à curiosidade, e, assim, numa atitude de progresso que se deseja, a reflexão a dar-se, a dar-se e a resultar, seria um facto profundo e inédito.

REFERÊNCIAS

[0] — **M.J. de Abreu Faro — P.L. Borges Teixeira e outros** — Concepção e projecto de sistemas de telecomunicações no País — Relato do Tema 4 —Congresso da Ordem dos Engenheiros, Novembro 1977, Publicado na Técnica — — 445-446-447-448-453.

[1] — **Umberto Eco** — O signo — Editorial Presença.

[2] — **J.G. Herculano de Carvalho** — Teoria da Linguagem — Atlantida Editora — Coimbra — 1967.

[3] — **Albert Bettex** — Inventeurs e Découvertes — Hachette.

[4] — **D.A. Bell** — Information Theory — London — 1953.

[5] — **Edmond Bauer** — L'Élegtromagnétisme-Hier et Aujourd'hui — Albin Michel.

[6] — **W.J. Baker** — A History of the Marconi Comcapy — Methuen — 1970.

[7] — **M.J. de Abreu Faro** — Comunicação por Impulsos — Estudo da Modulação de Sucessão de Impulsos — Dissertação para concurso ao lugar de professor catedrático do I.S.T., publicada com complementos na Técnica n.ºs 262, 263, 264 e 265 — 1956.

[8] — M.J. de Abreu Faro — Estudo das "Séries no Tempo" e a sua aplicação à determinação da resposta de sistemas lineares de transmissão — Técnica, n.ºs 275, 276 e 278 — 1958.

[9] — M.J. de Abreu Faro — Determinação do espectro de potência e da função de auto-correlação a partir de séries no tempo — Técnica n.º 295, 1959.

[10] — **James Martin** — Future Developments in Telecommunications — Prentice Hall, 1977.

A Hidráulica Hoje

A. BETÂMIO DE ALMEIDA *

APRESENTAÇÃO

Nas comemorações do 70.º aniversário do Instituto Superior Técnico, foi organizado um ciclo de conferências com o objectivo de dar a conhecer alguns aspectos da vida dos Departamentos e das Secções bem como dos diferentes domínios da Engenharia.

No que respeita a Secção de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil, entendeu-se que seria mais indicado organizar um painel de intervenções a cargo de docentes da Secção e subordinado ao título genérico "A Hidráulica Hoje", de modo a possibilitar uma visão um pouco mais completa de diferentes domínios da Hidráulica.

Os oradores e temas deste painel foram os seguintes:

— A. Betâmio de Almeida — Introdução ao painel e "Hidrodinâmica dos regimes Transitórios".
— João N. Hipólito — "Hidrologia".
— A. Sá da Costa — "Hidrologia da Águas Subterrâneas e Recursos Hídricos".
— J. Vieira da Costa — "Estruturas e Obras Hidráulicas".
— A. Lobato de Faria — "Saneamento Básico".
— I. Mota de Oliveira — "Hidráulica Marítima e Engenharia Costeira".

Os temas das intervenções seleccionadas cobrem, parcialmente, áreas correspondentes às disciplinas que estão a cargo da Secção de Hidráulica e que, actualmente (1982), são os seguintes:

— **No curso de licenciatura de Engenharia Civil:** Hidráulica I e II, Hidrologia, Aproveitamentos Hidráulicos, Obras Hidráulicas, Hidráulica Fluvial, Hidráulica Marítima, Obras Marítimas e Saneamento Básico I e II.
— **No curso de licenciatura de Engenharia Electrótecnica:** Aproveitamentos Hidroeléctricos.
— **No curso de Engenharia de Minas:** Elementos de Hidráulica.

A Secção de Hidráulica tem ainda a seu cargo a organização do curso de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos e acções de investigação coordenadas e apoiadas pelo Centro de Estudos de Hidrossistemas — CEHIDRO, criado em 1981.

INTRODUÇÃO HISTÓRICA

Definir o que é Hidráulica: tarefa simultâneamente fácil e difícil. Fácil, porque a Hidráulica é já muito antiga, conhecida e até popular (basta lembrar a popularidade do princípio de Arquimedes) podendo mesmo dizer-se que a história da Hidráulica acompanha a História da Civilização Humana. Difícil, porque actualmente a Hidráulica abrange novas áreas científicas, responde a novas preocupações, entrelaça-se com muitos outros ramos da Ciência e as respectivas fronteiras apresentam-se difusas, pouco definidas.

Escolhendo uma, entre as muitas existentes definições, possíveis para a Hidráulica, poder-se-à dizer que é a "Ciência cujo objecto é a utilização e o acondicionamento das águas, dos líquidos" (Enciclopédia Luso Brasileira).

Com raízes comuns às da Mecânica dos Fluidos, a Hidráulica foi assumindo características de ciência

* *Professor auxiliar do IST, Departamento de Engenharia Civil, Secção de Hidráulica. Na ausência do coordenador da Secção de Hidráulica, Professor António Quintela, o autor foi encarregado de apresentar uma palestra, sobre um tema de Hidráulica, nas comemorações realizadas no IST.*

muito pragmática ligada a grandes empreendimentos e à resolução de grandes necessidades sociais: transporte, irrigação, abastecimento de água, produção de energia, entre outras.

O aparecimento da Hidráulica como ciência autónoma não tem, evidentemente, uma data bem definida mas pode dizer-se que os sinais da respectiva individualização vão-se tornando perceptíveis e fortes com as contribuições provenientes do desenvolvimento do método experimental (século XVI — L. da Vinci), da Hidrodinâmica teórica como ramo da matemática aplicada (séculos XVIII e XIX — Bernoulli, Saint-Venant, Navier, Stokes) e da teoria da semelhança e técnicas de modelos reduzidos e de estudos em instalações experimentais (séculos XIX e XX — Reynolds, Froude, Joukowsky).''

Com a revolução industrial (século XIX), a Hidráulica passa a ter um papel muito importante na produção de energia eléctrica e a ser considerada como ramo da Engenharia Civil sendo até frequente, ao nível do grande público e até meados do século XX, que a imagem da Hidráulica aparecesse com frequência relacionada com a da construção de grandes barragens e centrais hidroeléctricas.

Não obstante a Hidráulica poder encontrar os seus fundamentos teóricos na Mecânica dos Meios Contínuos e adoptar a respectiva formulação matemática, é um facto histórico que, atendendo à complexidade dos problemas e fenómenos a estudar e até à urgência na resolução de alguns casos práticos, os êxitos e prestígio alcançados pela Hidráulica se tivessem ficado a dever em grande parte à utilização adequada do método experimental e das técnicas de modeção física. É de justiça sublinhar o papel que, em Portugal e neste domínio, teve o Laboratório Nacional de Engenharia Civil bem como alguns docentes deste Instituto.

Com o advento do computador digital (por volta dos anos sessenta do presente século), começou uma nova era para a Engenharia e também para a Hidráulica. Com base em modelos matemáticos, os modelos computacionais automáticos foram-se tornando indispensáveis na execução dos cálculos hidráulicos e como ajuda muito valiosa nas actividades de projecto e de exploração de sistemas hidráulicos complexos. Em alguns casos, estes modelos puderam substituir total ou parcialmente os modelos físicos.

Por seu turno, o desenvolvimento e domínio das técnicas de cálculo automático veio exigir alterações significativas no ensino da Hidráulica e na actividade prática dos hidráulicos. Longe está, no entanto, a época em que a modelação física deixará de ser necessária, avizinhando-se sim a época em que as duas técnicas de modelação passarão a ser utilizadas com frequência em conjunto ou melhor, em complementariedade.

A somar às inovações no âmbito dos métodos de análise e de cálculo, há a juntar uma crescente especialização, com o aparecimento de muitos subdomínios em que as actividades de investigação são férteis e dão origem a uma apreciável quantidade de informação técnico-científica, e uma aproximação com outros ramos da Engenharia e da Ciência. Neste último aspecto há a salientar a forte intervenção da Hidráulica em aspectos relacionados com os recursos hídricos, a defesa do meio ambiente e a procura de novas fontes de energia.

HIDRODINÂMICA DOS REGIMES TRANSITÓRIOS

Introdução

A Hidrodinâmica dos regimes transitórios é aqui apresentada como paradigma da evolução ocorrida em muitos domínios da Hidráulica nas últimas duas décadas.

No início dos anos sessenta, o regime variável nos escoamentos em pressão ou com superfície livre merecia, na maioria dos compêndios e livros de Hidráulica, uma breve referência ou, no máximo, um ou dois capítulos com matéria baseada, em geral, nos trabalhos clássicos de Allievi e de Bergeron apresentados no início do século. Hoje, contudo, os **regimes transitórios em pressão**, são já assunto com importância suficiente para a realização de vários congressos, periódicos ou não, e para múltiplas edições de numerosos livros e manuais especialmente dedicados a essa matéria.

Por **regime transitório** designa-se o tipo de regime variável que ocorre na transição entre dois regimes permanentes, incluindo o correspondente à anulação do caudal (figura 1). Nos escoamentos em pressão, os regimes transitórios poderão condicionar a segurança e a operacionalidade dos sistemas podendo a respectiva análise vir a ser determinante na escolha das características geométricas e resistentes das condutas, bem como no dimensionamento de eventuais dispositivos de protecção.

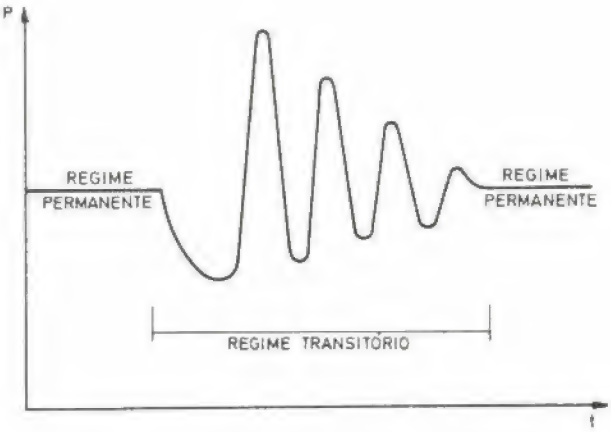


Figura 1 — Variação típica da pressão, num sistema elevatório ou de bombagem durante um regime transitório.

Objectivo e dificuldades na análise

No estudo dos regimes transitórios em pressão tem-se, em geral, por objectivo principal a obtenção, em diferentes pontos dos circuitos hidráulicos, da variação da pressão com o tempo e, em particular, das

envolventes dos respectivos valores máximos. Interessa, assim, conhecer não só os valores máximos da pressão, que podem pôr em causa, de forma directa, a integridade das componentes do sistema hidráulico, como também os valores mínimos, podendo ambos virem a indicar alterações importantes no comportamento dinâmico do fluido.

As principais dificuldades na análise matemática deste tipo de problemas são as seguintes:

— na **formulação matemática** (estabelecimento do modelo matemático), a caracterização em regime variável do **comportamento do fluido** (e.g. mudanças de fase e escoamentos difásicos, comportamento reológico não linear e efeitos dissipativos adicionais), do **comportamento do equipamento** (e.g. válvulas, bombas e turbinas hidráulicas) e dos possíveis efeitos provenientes da interacção entre o fluido e as paredes das condutas e respectivos apoios (análise mista hidráulico-estrutural).
— **na obtenção de resultados** (integração das equações básicas).
— **na implementação e calibração dos programas de cálculo automático.**

Análise qualitativa sumária

Qualquer alteração de funcionamento de um sistema hidráulico em pressão, tendente a estabelecer um novo regime permanente, dá origem a variações transitórias da pressão e do caudal. No caso de ocorrerem pressões suficientemente baixas (inferiores à pressão atmosférica, na prática) deixará de ser válido admitir que o fluido é monofásico. Com efeito, a expansão de bolhas de ar livre disseminadas pelo líquido e a eventual libertação de ar previamente dissolvido irão modificar as características de escoamento, constituindo o que se denomina por **macrocavitação transitória.**

Este tipo de cavitação pode apresentar três formas fundamentais de escoamento: **bolhoso,** com bolhas gasosas disseminadas pelo líquido; **separado,** com a fase gasosa concentrada na parte superor das condutas e com **rotura de coluna líquida,** com a fase gasosa ocupando totalmente um ou mais trechos das condutas. A possibilidade de ocorrência de cada uma destas formas de escoamento depende das características do sistema e, em particular da posição altimétrica das condutas.

No caso de escoamento bolhoso, a compressibilidade do fluido é alterada e o valor da celeridade das ondas elásticas passa a ser variável com o tempo. Efeitos dissipativos adicionais podem também ocorrer quando há macrocavitação.

Os modelos computacionais terão de ter em conta a possibilidade de ocorrência de qualquer destas formas de escoamento, podendo os resultados das simulações numéricas vir a diferir muito dos obtidos admitindo as hipóteses usuais: escoamento sempre totalmente líquido e contínuo e celeridade constante durante o regime transitório. De salientar que a macrocavitação tende, na maioria dos casos, a agravar os valores das pressões máximas transitórias.

Modelação matemática

Mediante hipóteses simplificativas, as equações básicas da Hidráulica e da Mecânica dos Fluidos (equação da continuidade, da quantidade de movimento e da energia) são, no estudo de sistemas de condutas, escritas supondo que o escoamento é unidimensional ou seja, tendo como variáveis independentes a distância **x** segundo o eixo e o tempo **t.**

Desprezando a quantidade de movimento da fase gasosa, as equações básicas que modelam o escoamento em trechos de condutas uniformes são em número de três:

— **Equação da continuidade da fase gasosa**

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho_g \alpha A) + \frac{\delta}{\delta x}(\rho_g \alpha A V) = TA \qquad (1)$$

em que Pg é a massa volúmica da fase gasosa, é a concentração volumétrica da fase gasosa, **A** é a área transversal da conduta, **V** é a velocidade média da mistura e **T** é a massa de gás libertada por unidade de tempo e de volume,

— **Equação da continuidade da fase líquida**

$$\frac{\delta}{\delta t}\left[\rho_l (1-\alpha) A\right] + \frac{\delta}{\delta x}\left[\rho_l (1-\alpha) A V\right] - TA \qquad (2)$$

em que Pl é a massa volúmica da fase líquida,

— **Equação da quantidade de movimento da fase líquida**

$$\frac{\delta}{\delta t}\left[\rho_l (1-\alpha) V A\right] + \frac{\delta}{\delta x}\left[\beta \rho_l (1-\alpha) V^2 A\right] + A\frac{\delta p}{\delta x} + \pi D Z - g \rho_l (1-\alpha) A \operatorname{sen} \Theta = O \qquad (3)$$

em que **P** é a pressão, **D** é o diâmetro da conduta, **Z** é a tensão tangencial na parede da conduta, **O** é o ângulo do eixo da conduta com a horizontal e Bo coeficiente de quantidade de movimento. Em escoamentos bolhosos transitórios admite-se ser válido admitir que $X \ll 1$ e que $Pg \ll Pl$. O sistema de equações (1) — (3) é do tipo hiperbólico quasi-linear e pode ser transformado no seguinte sistema de equações:

$$\frac{dp}{dt} \pm \frac{a}{C_2} \mp \frac{a b_3}{C_2} + b_1 c_1 - b_2 = O \qquad (4)$$

válidos ao longo das linhas características do plano (x, t) definidas por

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \qquad (5)$$

$$\text{e,} \quad \frac{dp}{dt} + C_1 \frac{dx}{dt} - b_2 = O \qquad (6)$$

válida ao longo da linha trajectória definida por

$$\frac{dx}{dt} = V \qquad (7)$$

sendo *a* a celeridade das ondas eléctricas no fluido mistura e **b1**, **b2**, **b3**, **c1**, e **c2**, parâmetros que são função das características geométricas e elásticas das condutas e dos fluidos, da dissipação de energia e, em particular, de α, **V** e **P**. A equação (6) traduz o comportamento da fase gasosa quando submetida a variações de pressão. A título de exemplo, apresenta-se a expressão de **a**, válida para a simulação de sistemas usuais em Engenharia Civil:

$$a = a_0 \, \bar{h} \left(\bar{h}^2 + C'C' \right)^{-0,5}$$

sendo $\mathbf{a_0}$ a celeridade na ausência da fase gasosa, $\bar{h}$ a altura piezométrica absoluta local e **C'C'** um parâmetro que depende das características elásticas do líquido e da conduta, da temperatura e da massa de gás livre existente por unidade de volume de mistura. No caso de ocorrência de escoamento separado ou de rotura da coluna líquida as equações básicas correspaondentes terão de ser modificadas.

Às equações básicas apresentadas há que juntar as condições iniciais e as condições de fronteira incluindo nestas últimas a modelação de equipamentos hidromecânicos.

Soluções exactas e numéricas

A obtenção de soluções exactas ou formais de problemas de regimes transitórios é muito difícil. Os casos em que já foi possível tal tipo de solução são muito simples, baseadas em muitas simplificações e de pouca utilidade para a maioria dos problemas práticos.

A solução numérica do sistema de equações (1) — (3) torna-se assim necessária bem como a utilização do computador digital. De entre os esquemas numéricos, explícitos ou implícitos, que têm vindo a ser adoptados salientam-se os de diferenças finitas, de elementos finitos e os baseados no método das características. Estes últimos são, no presente, os mais utilizados.

A integração numérica das equações (4) e (6) é feita segundo as linhas características EP e DP e a linha trajectória BP, linhas do plano (x,t) em que se define uma malha de cálculo fixa (figura 2). Num esquema explícito as incógnitas em P são determinadas a partir dos valores conhecidos para o instante de cálculo anterior em E e D por interpolação a partir dos valores obtidos para A, B e C.

Para além da questão da estabilidade numérica há que ter em conta o amortecimento fictício de origem numérica, que pode ser apreciável e afastar as soluções da realidade, e a eventual formação de **ondas de choque** de frente abrupta as quais podem exigir um tratamento especial pois correspondem a soluções descontínuas.

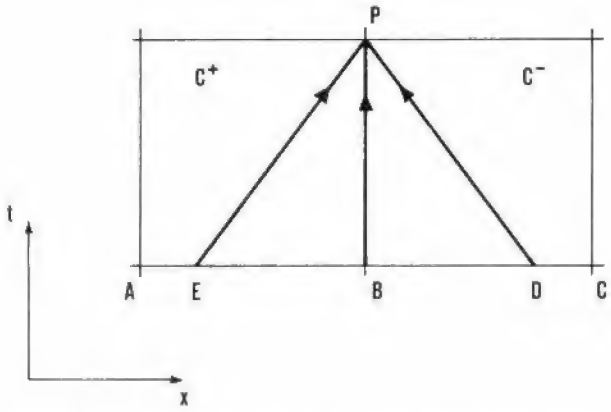


Figura 2 — Malha de cálculo utilizada no método das características (malha fixa com interpolação).

Calibração e aferição dos modelos

Os modelos computacionais actuais são baseados em numerosas equações em que intervêm muitos parâmetros. A atribuição de valores adequados a alguns destes parâmetros é ainda uma tarefa difícil, em particular no caso dos parâmetros respeitantes ao comportamento e à caracterização da fase gasosa. Por seu turno, os programas de cálculo automático incluem muitos artifícios e procedimentos operacionais que só a prática pode vir a provar ou a rejeitar. No que concerne os modelos de regimes transitórios em pressão é frequente acontecer que programas de cálculo automático de diferentes autores conduzam a resultados sensivelmente diferentes quando aplicadas a um mesmo caso.

Nesta conformidade, torna-se indispensável a execução de ensaios em protótipo ou em instalações experimentais para calibração e a aferição dos modelos e permitir uma melhor modelação matemática de alguns fenómenos.

As instalações experimentais são especialmente úteis para a observação, em condições controladas, de aspectos particulares dos regimes transitórios ainda mal conhecidos, tais como: dissipação de energia (com ou sem macrocavitação), comportamento hidráulico de misturas ar-água, rotura da coluna líquida em sistemas complexos (e.g. em condensadores) e o comportamento dinâmico de alguns equipamentos (e.g. válvulas de retenção).

Em alguns casos de oscilação em massa, é possível executar modelos físicos de acordo com as leis de semelhança. Quando estão em causa fenómenos elásticos ou envolvendo fluidos difásicos é quase impossível seguir as referidas leis. Tal não impede que o uso de instalações experimentais de dimensões mais reduzidas que as reais não seja útil e válido desde que se reconheçam as respectivas limitações e se sigam critérios menos exigentes.

O planeamento e a execução dos ensaios são tarefas demoradas e delicadas, envolvendo equipamento sofisticado e equipas com elementos de diferentes especialidades. No estado actual do desenvolvimento dos modelos computacionais, a existência de dados de

ensaios é considerada prioritária tendo até sido criado em 1981, no âmbito do estudo dos regimes transitórios em circuitos de refrigeração, um banco internacional de dados respeitantes a ensaios em protótipo.

Em Portugal, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e o Centro de Estudos de Hidrossistemas (CEHIDRO) do IST, têm executado em conjunto muitos ensaios deste tipo.

Importância e utilidade dos estudos

A análise dos regimes transitórios em pressão, tendo em conta os fenómenos referidos e as equações apresentadas, tem importância prática relevante. A Figura 3 mostra a evolução da cota piezométrica registada após a saída de serviço dos grupos electrobomba numa estação de bombagem de esgotos, semelhante a muitas outras existentes no País, e os resultados de simulações numéricas obtidas pelos modelos clássico (celeridade constante e sem caracterização da macrovitação) e de escoamento bolhoso. A comparação entre os resultados obtidos pelo cálculo e os valores registados em protótipo justifica a importância que tem uma modelação mais sofisticada do fenómeno.

Assim, e para além do interesse teórico, a análise dos regimes transitórios em pressão apresenta grande interesse prático nos seguintes sistemas hidráulicos:

— sistemas adutores de saneamento básico (condutas e sistemas elevatórios ou gravíticos);
— circuitos de água de refrigeração ou outros em centrais termoeléctricas, convencionais ou nucleares;
— sistemas hidroeléctricos, os sistemas com bombagem;
— sistemas de oleoductos e gaseoductos (sistemas de transporte de combustíveis em portos e aeroportos);
— sistemas adutores de fluidos diversos na indústria química.

Considerações finais

A breve apresentação que se fez dos regimes transitórios em pressão é, em termos gerais e qualitativos, válida para muitos domínios da Hidráulica que conheceram nos últimos anos um grande desenvolvimento com a utilização sistemática dos modelos computacionais automáticos e a realização de estudos experimentais para aferição destes e para um melhor conhecimento dos fenómenos em causa.

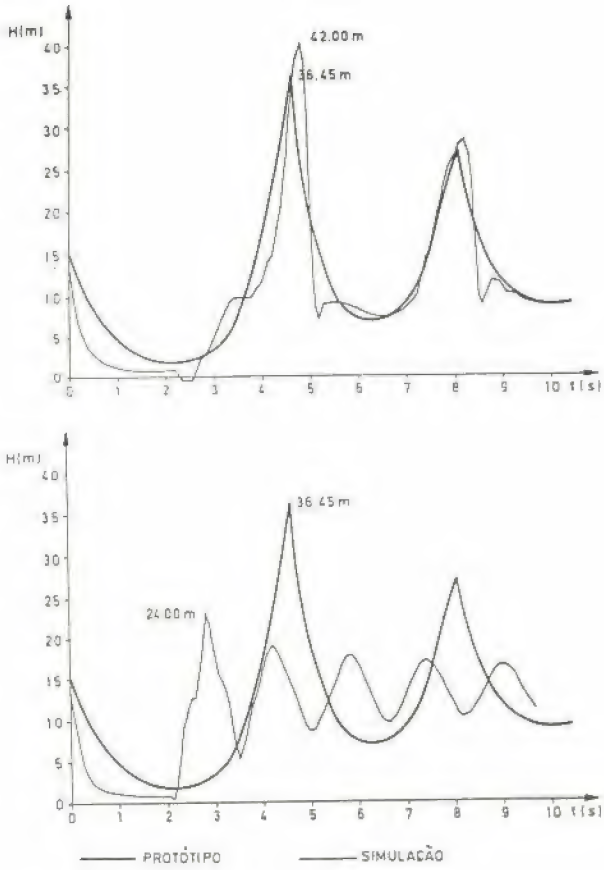


Figura 3 — Evolução da cota piezométrica na reacção inicial de uma conduta elevatória, após a saída dos grupos electrobomba: a) valores registados e calculados pelo modelo do escoamento bolhoso; b) valores registados e calculados pelo método clássico.

Cálculo Automático no Projecto Mecânico(*)

MANUEL SEABRA PEREIRA

INTRODUÇÃO

No domínio da Engenharia Mecânica, e em particular na disciplina do Projecto Mecânico os correspondentes critérios e métodos de análise têm sofrido uma evolução considerável neste século.

Nos anos cinquenta, em resultado de uma vasta experiência acomulada a filosofia do projecto pautava-se essencialmente por três regras:

1 — Definição de equipamentos com geometrias suficientemente simples, fáceis de ser equacionadas com os métodos analíticos então existentes.
2 — Especificações de níveis de tensão relativamente baixos e com elevados níveis de segurança.
3 — Permitir que materiais ducteis tolerassem, mesmo do domínio plástico, picos de tensão e esforços elevados em determinadas zonas, consideradas aceitáveis para suportar estas sobrecargas.

Com algumas honrosas excepções os equipamentos assim projectados, caracterizavam-se por terem um elevado nível de segurança, vidas expectáveis exageradamente longas mas, emformavam, em termos actuais, de alguns problemas, nos quais talvez os mais importantes eram os elevados custos de produção, excessivos pesos e fraca maneabilidade na sua utilização.

A concepção de equipamentos mecânicos bem como a verificação da sua resistência, e o seu dimensionamento, estava fortemente condicionado a um espectro de soluções analíticas relativamente estreito e que abrigavam a simplificações por vezes arrevezadas no respectivo cálculo e requeriam uma forte ingenuidade e habilidade por parte do engenheiro em lidar com estes problemas.

Com o aparecimento dos computadores, por volta dos anos 50, bem como os desafios postos a partir daí no desenvolvimento de indústrias de alta tecnologia (aeroespacial, aeronáutica e nuclear) ficaram criadas as condições naturais para o desenvolvimento de métodos numéricos de cálculo, para sua implementação em computadores e para uma vulgarização do seu uso, grangeando, estas técnicas nos dias de hoje, uma grande popularidade. Isto mesmo no seio de gabinetes de projecto e de estudo que se ocupam com a concepção e cálculo de equipamentos de tecnologia tradicional tais como, motores de combustão interna, reservatórios de pressão e estruturas mecânicas utilizadas no manuseamento de cargas (pórticos, guindastes, etc.).

MÉTODOS ANALÍTICOS E MÉTODOS NUMÉRICOS

Para aqueles menos familiares com estas designações vale apenas talvez mencionar o clássico e histórico exemplo, do cálculo de perímetro de uma circunferência.

Os métodos de análise matemática fornecem-nos a ferramenta necessária ao cálculo do comprimento de uma linha, conhecida a sua geometria. No caso da circunferência chegamos ao resultado

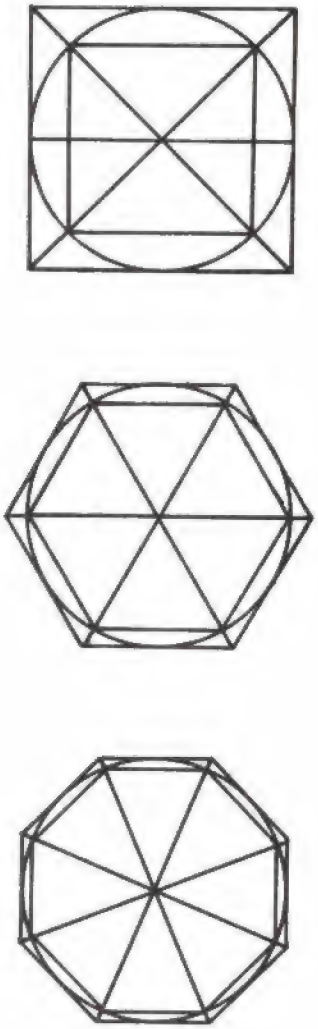
$$P = 2 \pi r$$

O problema está em calcular o número π

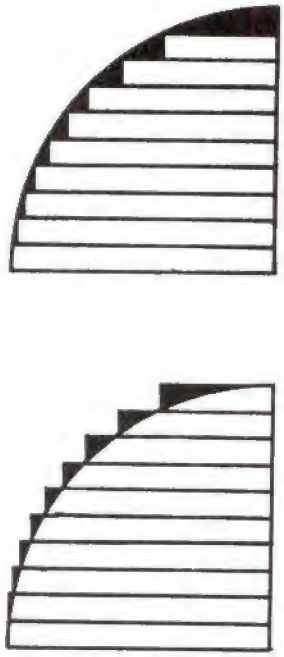
Adoptemos um método intuitivo de natureza geométrica em vez do método matemático rigoroso:

Substituindo o círculo por um polígono, os comprimentos dos lados podem ser somados e podemos obter uma boa aproximação para o cálculo do perímetro. Arquimedes, utilizando este método provou que o valor π se encontrava entre 3,1/7 e 3,10/71 construindo polígonos inscritos e circunscritos à circunferência, na hipótese que o perímetro da circunferência era uma solução intermédia entre as duas soluções aproximadas.

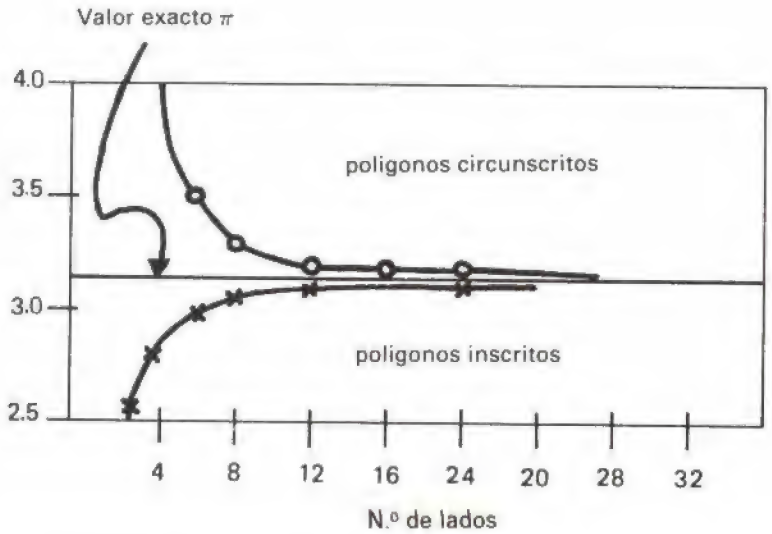
(*) *Palestra proferida no âmbito das comemorações dos 70 anos do IST.*



a) Método dos perímetros



b) Método das àreas



Cálculo aproximado do valor de π

No cálculo da área do círculo, é descrito em vários livros de texto, que o eng.º chinês TSU CH'UNG CHIH (430 AD) demonstrou que o valor de se encontrava entre os limites 3.1415926 e 3.1415927 substituindo o círculo por pequenos rectângulos estreitos inscritos e circunscritos à circunferência.

Os métodos numéricos são aplicáveis a uma gama muito extensa de problemas de engenharia. Sob o ponto de vista das especialidades das suas aplicações podem-se classificar o tipo de problemas nos domínios de interesse e poderemos ter por exemplo:

Problemas de análise de tensões
Problemas de condução de calor
Problemas de escoamento de fluídos

Do ponto de vista analítico poderemos classificar os problemas nos seguintes tipos:

Problemas de equilíbrio
Problemas de valores e vectores próprios
Problemas de propagação

Nos primeiros o sistema em estudo não varia com o tempo e as equações que regem o problema têm a forma

$$f = k\,a$$

onde

f é uma força ou uma grandeza equivalente
k uma rigidez ou uma grandeza equivalente
a conjunto de incógnitas do tipo "deslocamento"

Os problemas do segundo tipo poder-se-ão considerar como uma extensão dos primeiros no qual valores críticos de certos parâmetros devem ser calculados.

A estabilidade e vibrações livres de estruturas lineares elásticas são exemplos deste tipo de problemas.

No terceiro tipo de problemas incluem-se aqueles em que se pretende analisar fenómenos transientes.

Nestes problemas poderá haver não linearidades, mesmo independentes do tempo e que poderão eventualmente ser tratados como problemas de propagação.

Os problemas acima referidos em regra são apresentados sob a forma de equações às derivadas parciais cuja solução analítica para casos concretos e reais se torna na maioria dos casos impossível de ser obtida.

Dos métodos numéricos mais utilizados, na solução destes problemas poderemos realçar os mais importantes que se indicam acompanhados das épocas onde se começou a sua utilização na solução em problemas de engenharia.

Diferenças finitas	— 1940-50
Elementos finitos	— 1950
Elementos de fronteira	— 1970

Vale apenas talvez sem pretender ser exaustivo fazer uma breve análise destes métodos.

No método das diferenças finitas as equações diferenciais são modeladas em termos de equações às diferenças finitas, ie, diferenças entre valores das funções para intervalos finitos. As várias derivadas que aparecem nas equações diferenciais são sistematicamente convertidas em termos de diferencas finitas em pontos vizinhos.

Este esquema é repetido de forma a cobrir o domínio em questão contemplando as condições de fronteira geométricas do problema.

No final a solução do problema apresenta-se sob a forma de um sistema linear de equações tipicamente da forma tri ou penta diagonal cujo algoritmo de solução é em regra relativamente simples.

Veja-se o exemplo da torção

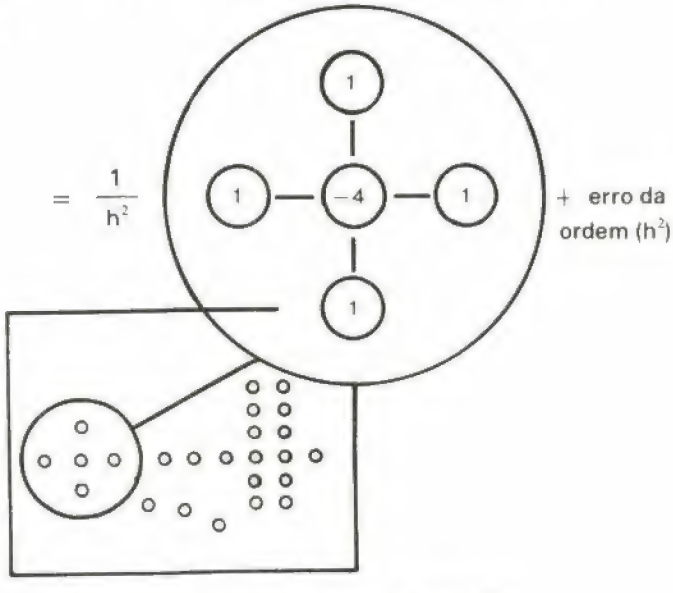
O fenómeno de torção é governado pela equação de Laplace

$$\nabla^2 \varnothing = 2G\theta \qquad c/\ \nabla^2 = \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2}$$

Em diferenças finitas

$$\nabla^2 = \frac{1}{h^2}\left[\delta^2_x + \delta^2_y\right]$$

$$= \frac{1}{h^2}\left[f(1) + f(3) + f(2) + f(4) - 4\,f(i)\right]$$



MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

1 — No método dos elementos finitos o domínio / / componente / região em causa é primeiramente dividido em regiões distintas não sobreponíveis conhecidas como **elementos.**

2 — Dentro destes elementos as variáveis principais são definidas ao longo do elemento e em particular, em pontos ou nós. O processo de discretização e interpolação dentro de cada elemento é a chave da técnica dos elementos finitos.

3 — Para cada elemento calculam-se certas características normalmente expressas em termos de uma matriz de rigidez K^e e um vector de forças f^e. Existem vários processos para estabelecer as equações dentro de cada elemento e baseiam-se em métodos variacionais e residuais.

4 — As características globais do domínio / componente / região são obtidas agrupando adequadamente as matrizes K^e e os vectores f^e conduzindo a um sistema global de equações

$$K\,a = f$$

5 — A matriz deste sistema de equações é normalmente diagonal dominante, bandeada e simétrica.

ELEMENTOS DE FRONTEIRA

Este método teve talvez as suas origens por volta dos anos 60 e foi aplicado no estudo de escoamentos em torno de aviões (Métodos dos painéis) mas só recentemente mediante a aplicação de técnicas desenvolvidas no método dos elementos finitos, esta técnica foi reexaminada e desenvolveram-se algorítmos que têm vindo a ter cada vez maior aplicação em problemas de engenharia nomeadamente nos domínios de análise de tensões, problemas de condução de calor e escoamento de fluídos.

Esta técnica, ao contrário dos elementos finitos em vez de aproximar as soluções no domínio, oferece soluções exactas a este mas viola (do ponto de vista matemático) as condições de fronteira do problema.

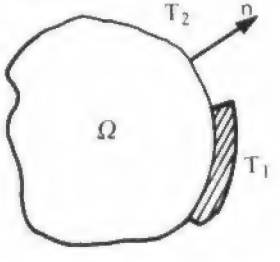
As condições de fronteira são então aproximadas utilizando técnicas variacionais e métodos residuais.

Considere-se o problema potencial

$$\nabla^2 u = 0 \text{ em } \Omega$$

$$u = \bar{u} \text{ em } T_1$$

$$\frac{\delta u}{\delta \bar{n}} = \bar{q} \text{ em } T_2$$



Se uma função de peso for introduzida, uma expressão variacional poderá ser escrita

$$\int (\nabla^2 u)\, u^*\, d\Omega = \int_{T_2} (q - \bar{q})\, u^*\, dT - \int (u - \bar{u})\, q^*\, dT$$

Se integrarmos por partes e oferecermos uma solução aos sistema que obedece às condições no domínio

$$\nabla^2 u^* + \nabla^i = 0 \text{ solução fundamental } u^* = \frac{1}{4\pi r}$$

$$u^i + \int_{T_2} u q^* dT + \int_{T_1} \bar{u} q^* dT = \int_{T_2} \bar{q} u^* dT + \int_{T_1} q u^* dT$$

Ao discretizar esta equação é-se conduzido a uma equação matricial do tipo

$$HU = G\theta$$

uma vez separadas as variáveis consoante são conhecidas ou não a equação anterior virá do tipo

$$AX = F$$

A matriz A é normalmente cheia e não simétrica.

Note-se que, no que respeita aos dois últimos métodos, apesar de alguns matemáticos, incluindo Courant terem publicado algum trabalho anterior à divulgação destes métodos, foram realmente as necessidades práticas de solução de problemas de engenharia, juntamente com o desenvolvimento dos computadores digitais electrónicos que actuaram como grandes catalizadores no rápido desenvolvimento dos métodos. Só mais tarde (1960s) vieram os matemáticos dar novos contributos ao entendimento teórico dos mesmos e fornecer novas bases sólidas à sua utilização.

BREVE COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS APRESENTADOS. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Sem procurar estabelecer polémica vale a pena rápidamente fazer uma breve análise crítica dos vários métodos e ajuizar das suas vantagens e desvantagens, isto ao nível da sua utilização prática na solução de problemas de engenharia.

No que respeita às diferenças finitas põe-se várias problemas ao nível das especificações das condições de fronteira e de definição da geometria. A utilização de alguns "truques" é necessária, dos quais o mais típico, talvez, é a especificação de nós fictícios além fronteira de forma a poder impor certos tipos de condições de fronteira. A definição de geometrias que não sejam rectangulares pode-se tornar complicada. Em contra partida partida os algorítmos a desenvolver e a respectiva programação são relativamente simples. Do ponto de vista numérico, os sistemas de equações a resolver são relativamente simples não obrigando a grandes esforços nos respectivos algorítmos.

O método dos Elementos Finitos oferece à partida várias vantagens que o tem tornado tão popular em aplicações de vária ordem.

O modelo geométrico dos domínios em consideração é feito de uma forma simples e quase exacta.

As matemáticas a manipular são em regra relativamente simples e as variáveis em jogo são em geral aquelas que têm mais significado físico para o utilizador comum, tais como a definição simples, num problema de análise de tensões, de deslocamentos impostos e forças aplicadas.

Os algorítmos envolvidos são ligeiramente mais complicados que os de diferenças finitas.

Do ponto de vista numérico, na maioria das situações é-se conduzido à solução de sistemas de equações bandeadas simétricas de que já há na literatura extenso software publicado para a solução destes sistemas de equações.

Por último, refira-se a técnica dos integrais de fronteira. Neste método as matemáticas a manipular são mais complicadas que nas duas técnicas anteriores. Em regra os termos têm pouco significado físico e a manipulação das respectivas expressões não é fácil para o engenheiro mais virado para as utilizações práticas.

Neste método põem-se questões delicadas de integração numérica que podem aumentar drasticamente as dificuldades no desenvolvimento dos respectivos algorítmos.

No final dos algorítmos é-se normalmente confrontado com a solução de um sistema de equações

cuja matriz é cheia e não simétrico e fortemente mal condicionada.

A discretização dos modelos / regiões / componentes neste caso é extremamente mais simples uma vez que se tem que focar a atenção apenas na fronteira do problema. Note-se que a obtenção dos valores das várias incógnitas no domínio é viável e não oferece dificuldades de maior.

O método tem provado ser eficiente em zonas onde existem fortes gradientes das incógnitas, em termos de análise de tensões, onde existe forte concentração de tensões e até mesmo plasticidade contida a um pequeno domínio.

Tem sido publicado, nos últimos cinco anos, trabalhos em que autores se concentram na exploração das vantagens dos vários métodos, utilizando-os em simultâneo aproveitando deste modo o melhor dos três mundos.

No entanto pela literatura verifica-se que a utilização simultânea dos Elementos Finitos e Integrais de Fronteira tem sido preferível e mais fácil de desenvolver. Isto talvez devido ao facto de podermos afirmar sem grande falta de rigor científico que os elementos de fronteira poderão ser considerados elementos mistos com graus de liberdade de "deslocamentos" e "forças"

MEIOS DE CÁLCULO — COMPUTADORES — EVOLUÇÃO

Ainda não há muito tempo, e particularmente, em Portugal (50-60) faziam-se as primeiras tentativas da aplicação dos métodos atrás referidos no cálculo e projecto de equipamentos industriais. Era-se conduzido a sistemas de equações com algumas dezenas de graus de liberdade cuja solução levava equipas de engenheiros a ocuparem-se por tempos infindos à procura duma solução que estava longe de oferecer garantias quanto à exactidão dos resultados numéricos obtidos.

O desenvolvimento das técnicas atrás referidas perderia todo o seu significado prático, em termos da solução de problemas de engenharia se, não houvesse os correspondentes meios de cálculo capazes de dar, com o mínimo de dificuldade e de custo, resultados numéricos com precisões minimamente aceitáveis.

É óbvio que não é por acaso que o desenvolvimento dos métodos acima referidos têm acompanhado o desenvolvimento da indústria da electrónica digital, mais precisamente dos computadores.

Nos anos 50 apareceram as primeiras máquinas que foram utilizadas para cálculo científico, as firmas IBM, FERRANTY, HONEYWELL, BORROUGHS e ELLIOTS, entre outras, lançaram no mercado máquinas com potencialidades de processamento que alteraram substancialmente o panorama do cálculo científico. A linguagem FORTRAN foi desenvolvida e a comunidade de investigadores e engenheiros passou a dispor efectivamente de meios de cálculo capazes de processar em termos reais as técnicas de análise e algorítmos que dispunham.

Convém, no entanto, realçar que essa primeira geração de computadores possuia CPUs com memórias relativamente modestas, com periféricos lentos permitindo apenas a solução de problemas cuja grandeza típica em termos numéricos não excedia os 100 graus de liberdade o que em termos práticos significava, na maioria dos casos a análise de situações concretas com modelos relativamente grosseiros.

Nos anos 65-70 o lançamento no mercado de grandes máquinas tais como os UNIVAC, os CDC e os maiores modelos da gama da IBM permitiu em simultâneo o desenvolvimento de grandes grupos de software utilizando essencialmente o método dos Elementos Finitos. São exemplo o Sistema ASKA (Un. Stuttgard, Prof. Argyris) o sistema BERSAFE (CEGB, UK) entre outros.

Nos tempos que correm, a comunidade científica dispõe de meios de cálculo potentes, rápidos e versáteis.

O desenvolvimento dos chamados mini-computadores (VAX, DATA GENERAL, HP, etc.) com velocidades de processamento elevadas e memórias centrais da ordem das 3-4 Mby alteraram consideravelmente o panorama de desenvolvimento de técnicas numéricas utilizadas no projecto mecânico.

Desenvolvem-se códigos com dezenas de milhares de instruções, desenvolvem-se sem grandes dificuldades modelos numéricos com um número de graus de liberdade que rondam a dezena de milhares.

Analizam-se sem grandes dificuldades problemas transientes e desenvolvem-se métodos de concepção, cálculo e projecto assistido por computador.

SITUAÇÃO ACTUAL

Existem neste momento cerca de 400 programas comerciais em cálculo automático de estruturas e de solução de problemas de engenharia nos domínios da condução de calor e outros.

Os preços, consoante as suas potencialidades e políticas comerciais variam de 50.000 escudos a 1.500.00 escudos.

São de realçar dentro destes os programas NASTRAN, SAP, PAFEC, ADINA, BESY, etc.

O desenvolvimento destes programas traduz-se em vários investigadores — ano de trabalho e vários milhares de horas de CPU.

Nos últimos 20 anos realizaram-se mais de 100 conferências neste domínio, publicaram-se mais de 30 livros de texto e seguramente mais de 10.000 artigos versando tópicos como:

— Sistemas interactivos de execução de programas
— Geração automática de modelos (redes)
— Algorítmos numéricos para solução de sistemas de equações, determinação de valores e vectores próprios. Utilização de memória auxiliar lenta, etc.
— Desenvolvimento de elementos em Estática, Dinâmica, Estabilidade de Estruturas (em regime linear e não linear)
— Desenvolvimento de elementos em problemas de escoamento de fluídos, condução de calor, efeitos térmicos, em regimes estacionários e transiente

— Elasto Plasticidade (pequenas e grandes deformações)
— Software de gráficos

Neste momento desenvolvem-se esforços consideráveis com problemas tipicamente não lineares quer na formulação matemática, quer nos métodos de programação. Destes problemas realçam-se:

1 — Dimensionamento automático de estruturas usando critérios de optimização ou programação matemática.

Exemplo:

Minimizar o peso de um componente ou estrutura sujeito a valores máximo de deslocamento ou certos níveis de tensão

2 — Configuração automática de estruturas.

Exemplo:

Optimização da geometria de uma estrutura sujeita a constrangimentos de deslocamento e tensão

Estes dois campos de desenvolvimento são normalmente designados na literatura anglo-saxónica por CAD — Computer Aided Design, e visam essencialmente a utilização do cálculo automático no desenvolvimento do projecto mecânico.

Pretende-se com o CAD utilizar o computador, de uma maneira interactiva e conversacional, incluindo a utilização de software de gráficos por forma a optimizar soluções construtivas no domínio do projecto de equipamentos mecânicos industriais.

DESENVOLVIMENTO DO CÁLCULO AUTOMÁTICO NO PROJECTO MECÂNICO EM PORTUGAL

A panorâmica geral aqui traçada sobre o estado da arte não ficaria completa sem analisar com algum detalhe a evolução deste domínio científico no nosso país.

Os primeiros passos dados nesta matéria tiveram origem em trabalhos feitos no seio do LNEC. Nesta Instituição de investigação foram desenvolvidos nos anos 60 programas para o cálculo de estruturas utilizando os chamados métodos das forças e dos deslocamentos que não se relacionam directamente com os métodos atrás descritos mas que, na prática, e do ponto de vista do utilizador, em tudo se assemelham.

Em presença de um caso concreto a especificação dos modelos numéricos em termos de dados bem como o tipo de resultados obtidos em tudo são semelhantes.

Foram também desenvolvidos outros programas que se destinavam essencialmente à análise de estruturas de Engenharia Civil tais como estruturas de edifícios, de barragens e pontes. Estes programas ainda se encontram em utilização.

Note-se que em matéria de cálculo automático de estruturas o assunto é interdisciplinar, os métodos de análise são formalmente os mesmos variando apenas nos tipos de aplicações, nos parâmetros em jogo e nos materiais mais correntemente utilizados em cada um dos sectores.

Para além das instituições bancárias, únicas detentoras de grandes máquinas mas viradas essencialmente à gestão, só mais recentemente as grandes empresas metalomecânicas onde se faz projecto para além do fabrico davam os seus primeiros passos numa utilização mais sistemática de computadores no projecto de equipamentos mecânicos.

A SOREFAME dispondo neste momento de um IBM 370 tem feito análises de tensões em vários tipos de estruturas desde reservatórios de pressão, pipping e equipamento utilizado em instalações de produção de energia hidráulica. Esta empresa tem desenvolvido alguns programas de elementos finitos alguns dos quais são utilizados na verificação do projecto de estruturas de material circulante.

Realce-se aqui um recente trabalho, já de dimensões consideráveis, na análise do comportamento elástico de uma bifurcação de grandes dimensões que oferecia ao projectista dificuldades de vária ordem no seu cálculo.

A MAGUE dispondo de um mini-computador IBM tem desenvolvido esforços no sentido de automatizar os seus cálculos de engenharia nos seus diversos sectores. Recentemente foi criado um sector de CAD em que, mercê da utilização de micro processadores, se tem desenvolvido algum software destinado a assistir o projectista nos vários cálculos relacionados com o projecto de parelhagem de manuseamento de cargas.

A PROFABRIL dispondo de um computador PRIME adquiriu, tal como a SOREFAME, o programa SAP que tem utilizado na análise e verificação de projecto de reservatórios de pressão.

Outras firmas de menor dimensão, sem meios de cálculo próprios têm-se socorrido de várias instituições (LNEC) e firmas comerciais (Time-Shering) para a execução de cálculos de vária ordem relacionados com o projecto mecânico.

O recente aparecimento no mercado dos chamados microprocessadores do tipo APPLE ou PET COMMODORE veio permitir que gabinetes de estudo de pequenas dimensões se tornassem de alguma forma autónomos em matéria de cálculo automático. Nessa pequenas máquinas que se podem adquirir por algumas centenas de contos (incluindo unidades de disketes e impressora), mediante uma programação adequada podem já fazer-se nelas cálculos com alguma profundidade e assim obter resultados significativos e susceptíveis de constituir verdadeiros auxílios no desenvolvimento do projecto mecânico.

Por fim cabe aqui fazer algumas referências à contribuição que o CEMUL tem dado ao país neste domínio cujas actividades por razões óbvias se conhecem um pouco de perto.

Ao longo dos últimos cinco anos são de destacar as seguintes actividades:

—Organização de cerca de 50 seminários destinados a docentes sobre o método dos elementos finitos e integrais de fronteira.

— Organização de 1 curso industrial em análise estática dinâmica e estabilidade de estruturas pelo MEF.
— Organização de 1 curso à SOREFAME sobre dinâmica de estruturas
— Curso de optimização estrutural
— Publicação de cerca de 15 artigos em congressos nacionais e internacionais
— Desenvolvimento de um elemento de casca para implementação no programa SAP5 da SOREFAME
— Desenvolvimento de elementos baseados na teoria de Vlasov
— Desenvolvimento de um programa para análise de estruturas
— Desenvolvimento de um programa utilizando o método dos integrais de fronteira bi e tridimensional
— Desenvolvimento de um programa elasto plástico utilizando o método dos integrais de fronteira
— Cálculo da estrutura de um autocarro UTIC pelo método dos elementos finitos
— Análise do comportamento estático e dinâmico do chassis do projecto XIMBA

Estão em curso, neste momento programas de investigação ligados a problemas de análise material e geometricamente não linear de estruturas. Desenvolvimento de algorítmos para o cálculo de frequências naturais e modos de vibração em modelos de grande complexidade estrutural (ex. estruturas de autocarros). Análise de problemas de contacto pelo método das desigualdades variacionais.

Estudos sobre fadiga de rolamento (estes dois projectos feitos no âmbito de doutoramentos no estrangeiro de investigadores do CEMUL). Desenvolvimento de técnicas gráficas com fins industriais.

Estão a dar-se neste momento os primeiros passoa no sentido de se dominar as técnicas de optimização estrutural por programação matemática e plasticidade por programação matemática.

O CEMUL dispõe juntamente com os outros centros no âmbito da Engenharia Mecânica de um mini computador HP 1.000 com 512 Kby de memória central, uma unidade de discos de 20 Mb, um plotter e 4 terminais leves. Este equipamento se bem que relativamente modesto para os fins em vista tem constituído um meio valiosíssimo de cálculo tendo em atenção os actuais fracos recursos que o I.S.T. dispõe nesta matéria.

Para finalizar ressalva-se apenas que se teve por objectivo dar uma imagem tão clara quanto possível sobre as acções que se desenvolvem em Portugal neste domínio. O inventário está longe de ser exaustivo e concerteza haverá lapsos em uma ou outra actividade.

PERSPECTIVAS PARA O FUTURO

O assunto do cálculo automático no projecto mecânico é vasto e complexo mas pelo menos aliciante para alguns.

O seu desenvolvimento encontra-se altamente dependente da evolução dos meios de cálculo, e nesta matéria uma simples extrapolação da evolução da tecnologia dos computadores deixa-nos descansadamente optimistas.

Quando se fala em desenvolvimento destas actividades pensa-se sempre em termos de investigação, por um lado, e aplicações industrias por outro, e estas duas realidades tanto quanto possível não deverão andar muito desfazadas.

No sector do ensino no I.S.T. têm-se desenvolvido alguns esforços no sentido dos alunos utilizarem os meios de cálculo actualmente existentes, iniciarem-se nas técnicas de programação e familiarizarem-se com os fundamentos do cálculo automático no projecto mecânico.

O actual curso de mestrado em Engenharia de Projecto Mecânico dá uma tónica significativa neste domínio e estão previstas várias teses nestas matérias.

Do ponto de vista industrial e aplicações torna-se cada vez mais claro a necessidade das empresas e serviços se familiarizarem com técnicas de cálculo automático no sentido de por um lado melhorarem o seu rendimento de produção de projecto mas fundamentalmente prepararem-se para as exigências cada vez mais apertadas das especificações dos produtos que pretendem vender para clientes nacionais e exportar para compradores no estrangeiro.

Neste contexto a aquisição de meios de cálculo e a formação e a reciclagem do seu pessoal técnico torna-se imperioso.

Em matéria de investigação, sob pena de se perder o comboio deverá manter-se um esforço de, na medida do possível (disponibilidades de meios de cálculo e potenciciais humanos), desenvolver trabalho científico a nível internacional e aqui cabem assuntos como

Comportamento elasto plástico de estruturas
Regimes não lineares de grandes deformações
Vibrações transientes
Optimização estrutural

Por outro lado, sob pena de perdermos, ou melhor, de nunca conseguirmos plenamente a ligação com a realidade prática e com a indústria e serviços, haverá inevitavelmente que investir alguns meios na solução de problemas com que nesta matéria a indústria se debate, e aqui cabem assuntos como

- Desenvolvimento de técnicas de análise para estruturas típicas da produção nacional
  Construção Naval — placas reforçadas — equipamentos metalomecânicos
- Cálculo à instabilidade estrutural
- Plasticidade dinâmica (material circulante e navios)
- Problemas ligados com a tecnologia de fabrico
  Extrusão, Máquinas-Ferramentas, Corte por arranque de apara
- Programas de geração automática de redes — Métodos gráficos

- Problemas de fadiga

- Programas de algorítmos respeitantes ao uso de códigos de construção FEM ASME

Não é fácil de viver com estes dois mundos mas julga-se que esta tarefa será tanto mais viável quanto maior for o diálogo entre indústria e universidade debruçando-se ambos sobre o desenvolvimento do cálculo automático no projecto mecânico em Portugal.

Aspectos da Investigação actual em Física dos Plasmas

CARLOS MATOS FERREIRA

Departamento de Física do IST e Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa (INIC)

Resumo — A Física dos Plasmas constitui um domínio de características transdisciplinares que, para além das suas múltiplas aplicações no campo da Técnica, se revela essencial para a compreensão de numerosos fenómenos naturais. Pensa-se hoje que mais de 99% da matéria do Universo se encontra no estado de plasma. Assim, o estudo dos plasmas contempla aspectos tão diversos como a produção de energia por via de fusão nuclear controlada, a criação de meios activos para a obtenção de radiações Laser, os mecanismos cinéticos que determinam a formação de moléculas e de agregados iónicos complexos nas atmosferas planetárias e no gás interestelar, os mecanismos de formação e de evolução das estrelas, e tantos outros. Apresenta-se neste trabalho uma breve panorâmica do que é a Física dos Plasmas hoje. Depois duma breve apresentação do tema, em que se põe em evidência a diversidade das características e da fenomenologia dos plasmas, analisam-se alguns aspectos significativos da investigação em curso em dois grandes domínios: o da fusão nuclear controlada, e o dos plasmas de Laser. Referem-se, por fim, algumas actividades de investigação em Física dos Plasmas desenvolvidas no Centro de Electrodinâmica da UTL.

1 — GASES IONIZADOS E PLASMAS

O termo plasma foi introduzida em Física pelos célebres físicos americanos Langmuir e Tonks para designar os gases ionizados, electricamente neutros à escala macroscópia, que se encontravam em certas regiões dos tubos de descarga que aqueles físicos investigavam. Desde então o termo foi usado, especialmente em Astrofísica, para designar um estado da matéria, relativamente diluído e semelhante a um gás, mas constituído por electrões e iões em porporções tais que o meio se apresenta globalmente neutro. Assim, um plasma, "propriamente dito", é um gás completamente ionizado, constituindo um quarto estado da matéria que se segue, por ordem de temperatura crescente, aos estados sólidos, líquido e gasoso.

No entanto, no uso corrente, a designação plasma estende-se igualmente aos gases parcialmente ionizados, i.e. constituídos por electrões, iões e partículas neutras, desde que globalmente neutros.

As propriedades específicas dos plasmas provêm da presença de partículas carregadas livres. Assim, embora certas propriedades dos plasmas diluídos se assemelhem muito às dos gases, as interacções coulombianas entre partículas, devido ao seu longo raio de acção, conferem ao estado de plasma propriedades de estrutura coesa (fenómenos colectivos). Num plasma podem suportar-se e propagar-se numerosos tipos de ondas, e.g. ondas electrostáticas a que estão associados campos de uma carga de espaço produzidos pelos movimentos colectivos das partículas, ondas longitudinais análogas às ondas acústicas, ondas transversais análogas às ondas electromagnéticas usuais, e ondas híbridas. Na presença de campos aplicados, que agem sobre os electrões e iões, o plasma pode evoluir para estados muito afastados do equilíbrio termodinâmico, em que, por exemplo, a "temperatura" dos electrões (ou a sua energia cinética média) é muito superior à dos iões e neutros. Neste caso o plasma comporta-se, em certa medida, como uma mistura de três fluídos de temperaturas diferentes, acoplados entre si pelas diferentes interacções entre electrões, iões e neutros. Destes processos de interacção (colisões) resulta uma abundante variedade de espécies atómicas e/ou moleculares em estados quânticos excitados, que podem ser precursores de numerosas reacções.

Dada a extensa e variada fenomenologia que contempla, a Física dos Plasmas desempenha hoje um papel de relevo em numerosos sectores da ciência e da técnica. No âmbito da investigação fundamental é de salientar, por exemplo, a importância da Física dos

Plasmas em Astrofísica, Geofísica e Cosmologia (estudo da ionosfera, magnetosfera e atmosfera terrestres, do vento, da fotosfera e coroa solares, da formação e evolução das estrelas e das galáxias, da constituição e propriedades do gás interestelar e das atmosferas planetárias, etc.). Pensa-se hoje que mais de 99% da matéria do Universo se encontra no estado de plasma. Numerosos problemas são também colocados à Física dos Plasmas em articulação com o desenvolvimento de novas técnicas. Citemos alguns exemplos relevantes: fusão nuclear controlada; conversão magnetohidrodinâmica e termoiónica de energia; tratamento e processamento de materiais e de superfícies; laser a gás; síntese de compostos químicos; motores para a propulsão e controlo de atitude de satélites; feixes de iões; fontes de radiação; etc.

2 — CLASSIFICAÇÃO DOS PLASMAS

A densidade electrónica e a temperatura dum plasma podem tomar valores dentro duma gama extremamente larga. A título de exemplo indicam-se no quadro 1 valores típicos daquelas grandezas nalguns plasmas usuais. Como se vê, existem plasmas de características muito diversas, desde o plasma ténue e relativamente quente do gás interestelar ($n_e \sim 1 - 10^{-3}$ cm^{-3}; Te $\sim 5\times10^3 - 2\times10^5$ K), até ao plasma denso e frio dos pulsares ($n_e \sim 10^{37}$ cm^{-3}; Te $\sim$ 1 K), ou ao plasma denso e extremamente quente que constitui o interior das estrelas usuais ($n_e \sim 10^{27}$ cm^{-3}; Te $\sim 3\times10^7$ K).

Dada esta enorme diversidade, é interessante estabelecer-se uma classificação que permita definir vários "tipos" de plasmas consoante os valores da densidade e da temperatura dos electrões. Assim, a uma dada gama de valores destas grandezas corresponde um determinado "tipo" de plasma, com uma fenomenologia bem caracterizada e descrito por um modelo teórico adequado a essa zona. Mostra-se na figura 1 um diagrama de classificação para o caso dum plasma cujos iões têm carga Z=1. Indicam-se ainda neste diagrama as posições de alguns plasmas usuais.

Para temperaturas extremamente elevadas, tais que $KT_e > m_e c^2$, encontra-se o domínio dos plasmas relativistas, cujo estudo só pode ser feito no quadro da teoria da Relatividade. A linha $KT_e = u_f$ em que u_f é a energia de Fermi do gás de electrões e K a constante de Boltzmann, separa o domínio dos plasmas clássicos, i.e., em que os electrões podem ser descritos como partículas clássicas obdecendo à estatística de Maxwell-Boltzmann, do domínio dos plasmas quânticos em que é necessário recorrer à estatística de Fermi-Dirac (aqui os efeitos quânticos, nomeadamente o Princípio de Exclusão de Pauli, desempenham um papel essencial). O vasto domínio dos plasmas clássicos, no qual se incluem, como se vê no diagrama, grande parte dos plasmas naturais ou produzidos em laboratório, subdivide-se ainda em dois domínios importantes, o dos plasmas cinéticos e dos plasmas correlados (ou colectivos). Para se compreender a distinção entre ambos é necessário introduzir três comprimentos característicos: a distância média entre electrões, $d_e = n_e^{-1/3}$; comprimento de Debye $\lambda_D = (E_o KT_e / n_e e^2)^{1/2}$, em que ϵ_o é a constante dieléctrica do vácuo e "e" o módulo da carga do electrão; comprimento de Landau, $r_o = e^2/4\pi E_o KT_e$. O comprimento de Debye representa uma medida da distância no interior da qual podem ocorrer desvios significativos à neutralidade do plasma;

	Plasmas usuais	n_e (cm^{-3})	T_e (K)
FRACAMENTE IONIZADO	Ionosfera (D: 70 Km)	10^3	300
	Descarga luminescente	10^{11}	10^5
	Descarga de arco	10^{15}	10^4
	Conversor MHD	10^{16}	10^3
FORTEMENTE IONIZADO	Gás interestelar	$1\cdot10^{-3}$	5.10^3-2.10^5
	Vento solar	3	10^5
	Ionosfera (F: 250 Km)	3.10^5	10^3
	Coroa solar	10^7	3.10^6
	Ionização superficial (alcalinos)	10^{12}	10^3
	Plasma criado por Laser	10^{19}	10^5
	Explosão nuclear	10^{20}	10^6
MATÉRIA DENSA	Electrões nos metais	10^{23}	300
	Interior das estrelas	10^{27}	3.10^7
	Interior das "Anãs Brancas"	10^{32}	10^7
	Pulsars	10^{37}	1

Quadro 1 — Densidade e temperatura dos electrões nalguns plasmas usuais.

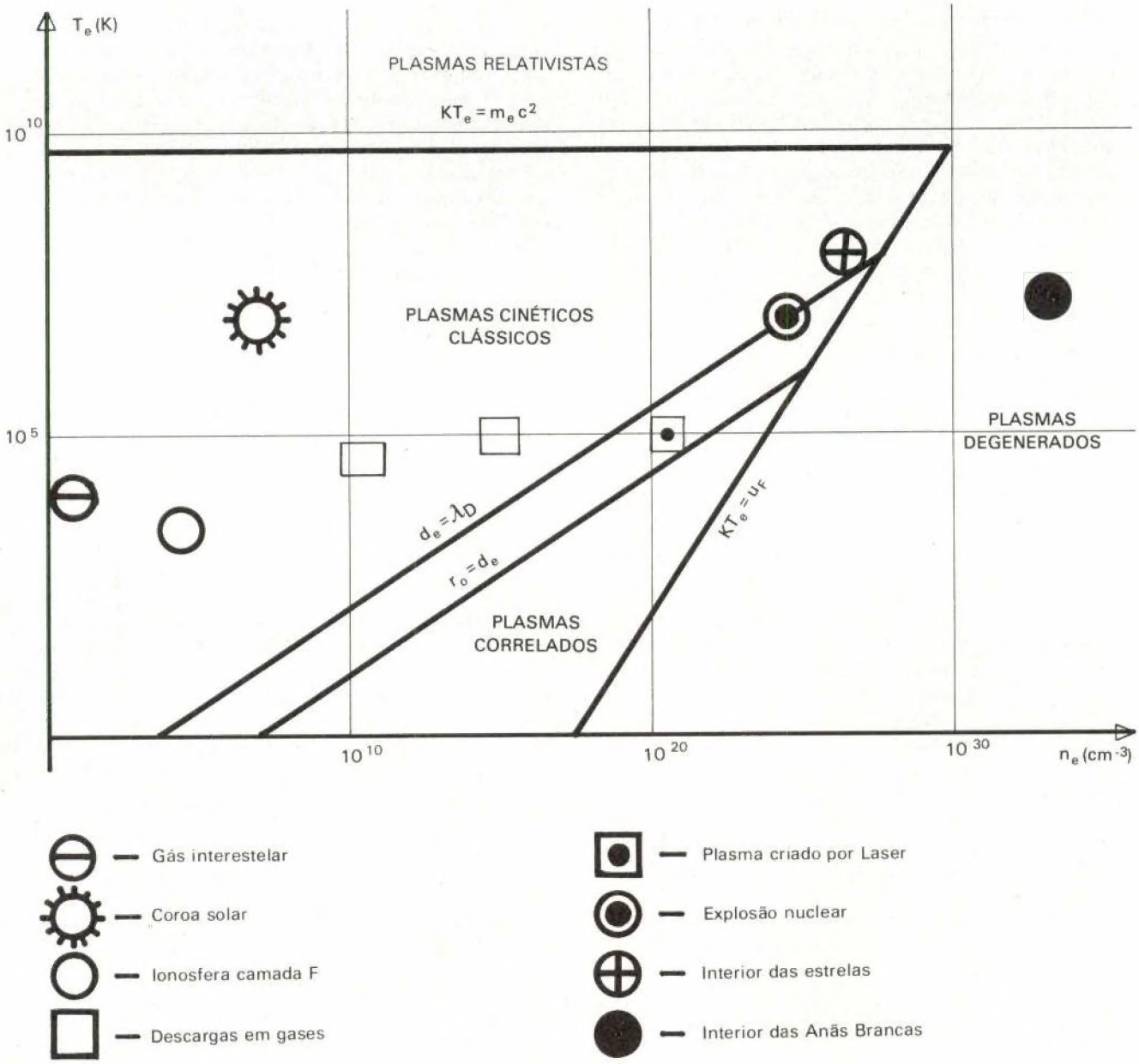


Fig. 1 — Diagrama simplificado de classificação dos Plasmas, segundo os valores da densidade e da temperatura dos electrões, e posição de alguns plasmas usuais.

assim, por exemplo, devido à força coulombiana, na vizinhança dum ião qualquer existirá sempre um excesso de electrões em relação ao valor médio da densidade do plasma, o que se traduz localmente por um desvio à neutralidade (embora o plasma seja globalmente neutro). Por outro lado, essa nuvem electrónica acumulada em redor de cada ião tem como efeito o de blindar quase totalmente o potencial desse ião para distâncias maiores que λ_D; um electrão qualquer do plasma sentirá o ião (i.e. interagirá com ele) se passar a uma distância dele inferior a λ_D, mas não "sentirá" qualquer efeito se essa distância for superior a λ_D, devido aos mecanismos de blindagem. Por seu turno, o comprimento do Landau r_o, como se vê pela sua definição, representa a ordem de grandeza da distância a que se devem aproximar dois electrões (ou um electrão e um ião com Z=1) para que a energia da interacção coulombiana seja da ordem da energia de agitação térmica. O domínio dos plasmas cinéticos clássicos corresponde ao caso em que $r_o \ll d_e \ll \lambda_D$. Devido à primeira desigualdade, $r_o \ll d_e$ a energia interna do plasma é apenas, essencialmente, energia da agitação térmica, logo o plasma comporta-se, em primeira aproximação, como um gás clássico de electrões e de iões; a segunda desigualdade, $d_e \ll \lambda_D$ significa que existem mecanismos de blindagem importantes (muitos electrões no interior duma esfera de Debye centrada em torno de cada ião). A modelização teórica desta família de plasma é, portanto, muito semelhante à dos gases clássicos; o modelo de gás ideal constitui uma primeira aproximação que pode ser corrigida por forma a ter em conta as interacções entre as partículas para distâncias

entre elas inferiores a λ_D(note-se, no entanto que estas correcções não são triviais e exigem teorias elaboradas para descrever os mecanismos de interacção no interior das esferas de Debye).

O caso $\lambda_D \ll d_e \ll r_o$ corresponde aos plasmas correlados, também chamados plasmas colectivos. Neste caso a energia de interacção é superior à energia de agitação térmica dos electrões e dos iões, pelo que esta família de plasmas apresenta certas analogias com os gases muito densos e com os líquidos. É interessante notar que, na prática, a transição de um plasma cinético para um plasma correlado ocorre quando o número de electrões na esfera de Debye se torna da ordem da unidade ou inferior, i. e. $\frac{4}{3}\pi\lambda_D^3 n_e \leq 1$. Tal situação corresponde quer ao caso dum plasma relativamente ténue a muito baixas temperaturas (e. g., $n_e \sim 10^{10}\,cm^{-3}$; $T_e \sim 1$ K), quer ao caso dum plasma denso a temperaturas intermédias (e. g., $n_e \sim 10^{20}\,cm^{-3}$; $T_e \sim 10^4$ K).

3 — TEORIA E EXPERIMENTAÇÃO EM FÍSICA DOS PLASMAS

Facilmente se compreende, da breve apresentação feita nos parágrafos anteriores, que a Física dos Plasmas constitui um domínio do conhecimento de âmbito inter e transdisciplinar. No plano teórico ela integra e transcende conhecimentos de numerosos sectores da Física: entre os mais importantes, citemos a Física Atómica e Molecular, a Mecânica Estatística, a Teoria Cinética e a Teoria dos Fenómenos de Transporte, a Física dos Fluidos, a Óptica e a Electrodinâmica, a Física dos Fenómenos de Superfície, etc. É particularmente elucidativo, a este respeito, analisar os currículos de base dos cursos de pós-graduação em Física dos Plasmas ministrados em Universidades estrangeiras. A título de exemplo, apresenta-se no quadro 2 o currículo do curso de Física dos Plasmas em França, curso de âmbito nacional e em que participam as Universidades de Paris XI (Orsay), Paris VI, Nancy I, Grenoble I, Orléans e Toulouse III. Existem, obviamente, diferenças significativas nos currículos dos cursos dum país para outro, as próprias Universidades tendem a restringir e a especializar o âmbito dos seus cursos, mas os dados do quadro 2 constituem, no entanto, um exemplo paradigmático.

No plano da experimentação a Física dos Plasmas recorre igualmente a múltiplos métodos e técnicas para a criação de plasmas artificiais e para o diagnóstico quer destes, quer dos plasmas naturais. Uma tal multiplicação impõe-se, dada a extrema riqueza e diversidade da fenomenologia própria de um plasma. É frequente, numa mesma instalação experimental, recorrer-se simultaneamente a métodos de diagnóstico de plasmas tão variados como e.g., espectroscopia de emissão e de absorção, sondas electrostáticas, micro-ondas, interferometria (em particular interferometria Laser) fluorescência induzida por Laser, etc. Por outro lado, a dimensão e complexidade das instalações experimentais apresenta também uma

ENSINO GERAL (1 semestre)	
— Gases Neutros — Gases Fracamente Ionizados — Plasmas — Equações Gerais da Teoria Cinética e da Hidrodinâmica	— Física Atómica e Molecular dos Plasmas — Ondas nos Plasmas e Radiamento — Diagnóstico de Plasmas
TRABALHOS PRÁTICOS (1 mês)	
CURSOS ESPECIALIZADOS (3 opções à escolha de 1 mês cada)	
— Ondas e Turbulência — Lasers a Plasmas — Plasmas Densos e Plasmas Fortemente Correlados — Propagação de Ondas na Atmosfera — Fusão por Confinamento Magnético — Descargas em Gases — Teoria da Turbulência — Tratamento de Sinais e Teoria da Informação	— Fusão Inercial — Feixes de Electrões Relativistas — Fontes de Iões — Física Aplicada do Vácuo e das Superfícies — Física Atómica e Diagnóstico Espectroscópico dos Plasmas — Química dos Plasmas — Diagnóstico das Colisões Atómicas

Quadro 2 — Esquema curricular do ensino de pós-graduação (Diplôme d'Etudes Approfondies) em Física dos Plasmas, em França, nos últimos anos lectivos.